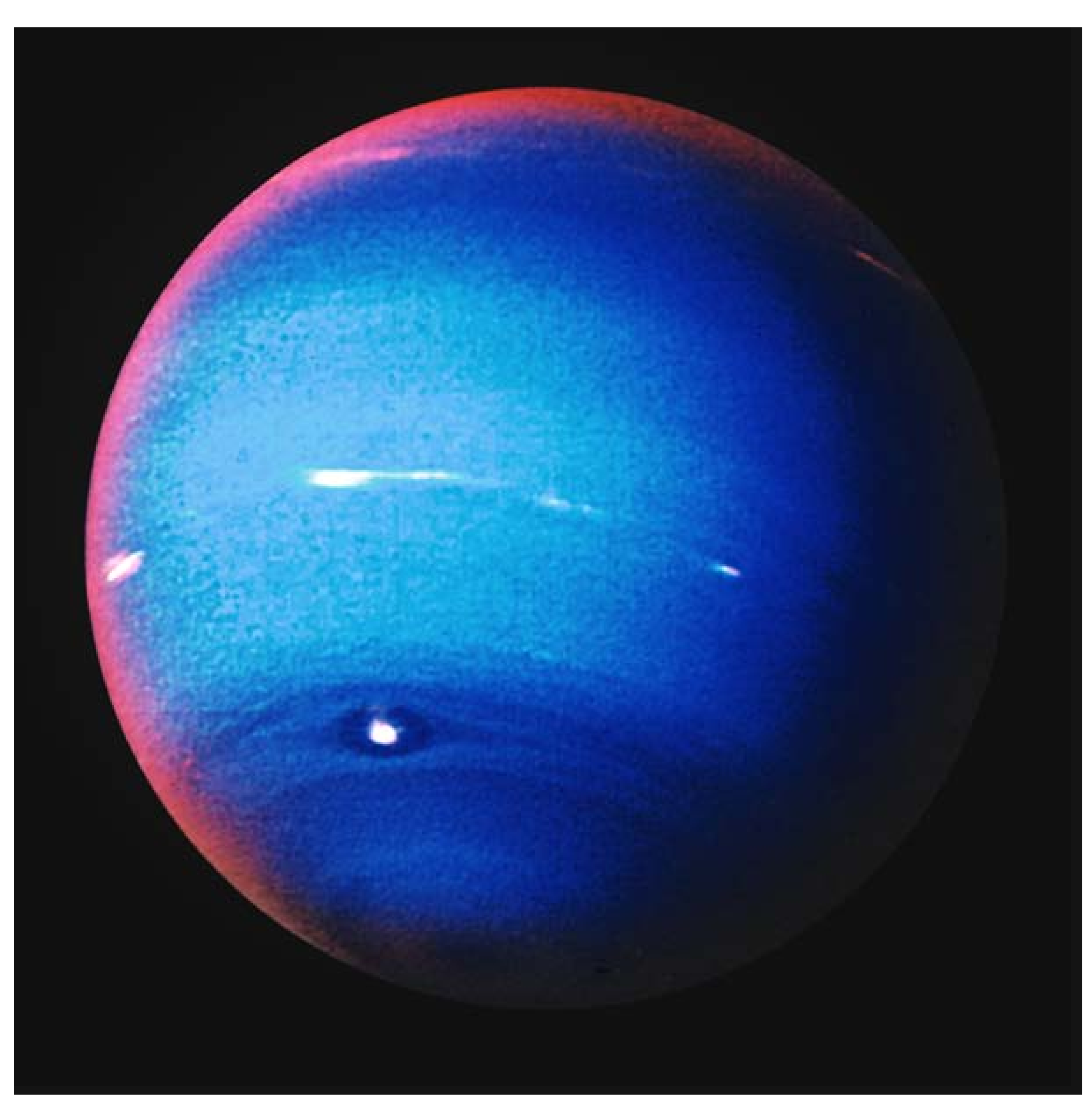
INVESTIGACION y CIENCIA

LA DESINTEGRACION BETA DOBLE

LOS VIRUS DE LA GRIPE

EL PLEXO COROIDEO DE LOS MAMIFEROS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



METANO EN NEPTUNO

ENERO 1990
500 PTAS.



Enero de 1990 Número 160



Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Gracia: *Los incendios de Yellowstone*; Ramón Pascual: *La desintegración beta doble*; Santiago Torres: *Así reconocen las células T a los antígenos*; Enrique Font: *Plexos coroideos de los mamíferos*; Luis Bou: *Neptuno* y *Juegos de ordenador*; Antonio Blanco Freijeiro: *La carretera más antigua del mundo*; Juan P. Adrados: *El metanol, un combustible alternativo*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Ana M. López Alvarez y Santiago Palomero Plaza, Esther Boix, Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

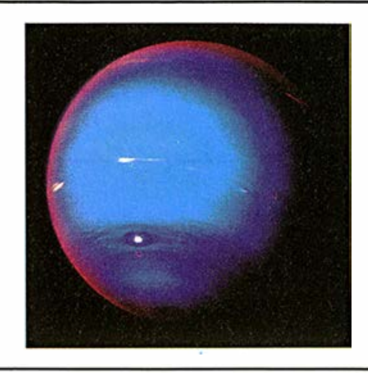
Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Alonso, Manuel Morán, Philip Morrison y José M. Vidal

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Gary Braasch
8-11	Tom Prentiss
12	Johnny Johnson
13-14	William H. Romme
15	Gary Braasch
19-25	Gabor Kiss
27	Morten H. Nielsen y Ole Werdelin, Universidad de Copenhague
28-30	George V. Kelvin
31	Mark M. Davis y Pamela J. Bjorkman, Universidad de Stanford
32-33	George V. Kelvin
34	Mark A. Saper, Universidad de Harvard (*arriba*), George V. Kelvin (*abajo*)
45-49	Carol Donner
50	Johnny Johnson
52-53	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio/ Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California
54	Hank Iken (*arriba*), NASA/ Laboratorio de Propulsión a Chorro (*abajo*)
55-60	NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro
62	Claude Hannoun y colaboradores
64-68	Antonio Aragón Minguell, José A. Cabezas, Claude Hannoun
71	Patricia J. Wynne (*izquierda*), John M. Coles (*derecha*)
72-74	Patricia J. Wynne
75	John M. Coles
76	Patricia J. Wynne
79-81	George Retseck
82-83	Johnny Johnson
84	George Retseck
86-89	Michael Goodman
93	Russell Ruthen
94	Edward Bell
95	Andrew Christie



LA PORTADA muestra la imagen cartografiada en falso color del metano de la atmósfera de Neptuno (véase "Neptuno", por June Kinoshita, en este mismo número), tomada con un filtro que admite luz a una frecuencia absorbida por dicho gas. La neblina visible en lo alto de la capa de metano refleja la luz solar en el borde del disco, produciendo un brillante contorno rojizo. En el centro del disco, la luz del sol atraviesa la neblina y es absorbida por el metano, originando un color azulado. Las zonas blancas brillantes son capas de cirros, de alta reflectancia.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

José M.ª López Piñero

...*cien años*

Federico Rubio Galí publicó *La socio-patología*, expresión del interés que el gran cirujano tuvo al final de su vida por las cuestiones médico-sociales.

Nacido en el Puerto de Santa María en 1827, Federico Rubio estudió medicina en la Facultad de Cádiz, donde obtuvo el título de licenciado en 1850. Tuvo entre sus maestros a Manuel José de Porto y a José de Gardoqui, en unos años en los que había comenzado ya a declinar la importante escuela anatomoclínica gaditana, encabezada durante las décadas anteriores por Francisco Javier Laso de la Vega. Fue un alumno brillante, que ganó la plaza de ayudante disector en 1845 e incluso publicó un *Manual de Clínica Quirúrgica* (1849) antes de graduarse.

Terminados sus estudios se asentó en Sevilla, ciudad en la que no tardó en adquirir un gran prestigio como cirujano. Al mismo tiempo se relacionó con sus ambientes intelectuales y políticos más progresistas. Desde el punto de vista filosófico, resultó principalmente influido por Federico de Castro Fernández, discípulo del krausista Julián Sanz del Río y catedrático de metafísica de la Universidad de Sevilla. Dicho influjo se refleja en *El libro chico* (1863), folleto que Rubio dedicó a resumir sus ideas filosóficas y psicológicas, que desarrolló después en un volumen de casi trescientas páginas, titulado *El Ferrando* (1864), publicado para defenderse de una crítica adversa.

Seguidor de ideas políticas radicales desde su época de estudiante, se adhirió al republicanismo federal de Francisco Pi y Margall a partir de la revolución de 1854. Las medidas represivas de los gobiernos derechistas le obligaron a ausentarse de España en 1860 y 1864. Supo, sin embargo, convertir su exilio político en ocasión de completar su formación científica. En la primera de las fechas citadas, trabajó en Londres como cirujano junto a William Fergusson. En la segunda, tras una breve temporada en Montpellier, residió en París, donde completó su preparación quirúrgica en los servicios hospitalarios de figuras como Alfred Velpeau, Pierre Paul Broca y Auguste Nelaton. También asistió allí a los cursos de microscopía del venezolano Eloy Carlos Ordóñez, discípulo de Charles Robin, que fue asimismo maestro de Aureliano Maestre de San Juan.

La revolución de 1868 favoreció, tras su regreso a Sevilla, el desarrollo de sus proyectos científicos y políticos. A petición suya, la junta revolucionaria local fundó, en octubre de dicho año, la Escuela Libre de Medicina y Cirugía de Sevilla, que fue la primera en España que contó con cátedras destinadas a las especialidades y a disciplinas básicas como la histología. Rubio se encargó en ella de la enseñanza de la clínica quirúrgica. Por otra parte, fue elegido, en enero de 1869, para representar a Sevilla en las Cortes constituyentes, como cabeza de la candidatura republicana. Volvió a ser elegido diputado en 1871 y, al año siguiente, senador. La República lo nombró en 1873 embajador en Londres pero, como el Gobierno británico no llegó a reconocer al nuevo régimen español, volvió a aprovechar su estancia allí desde el punto de vista científico. También realizó el mismo año un viaje a los Estados Unidos, donde visitó las principales instituciones de Nueva York, Filadelfia y Chicago relacionadas con la cirugía.

A su regreso fijó su residencia en Madrid, adonde prácticamente se había trasladado desde comienzos de 1870. Lo mismo que en Sevilla, consiguió un gran éxito profesional como cirujano. Apartado de la política activa a partir de 1875, continuó, sin embargo, relacionado con los ambientes intelectuales más abiertos, en especial con el que rodeaba a Francisco Giner de los Ríos y la Institución Libre de Enseñanza. Desde el punto de vista médico se relacionó igualmente con las personalidades renovadoras y con las instituciones que, de acuerdo con el principio revolucionario de libertad de enseñanza, intentaron superar las estructuras anquilosadas del mundo académico oficial. Colaboró de esta forma con Ezequiel Martín de Pedro y José Eugenio de Olavide y fue profesor en la Escuela Libre de Medicina y Cirugía de Pedro González de Velasco.

El propio Rubio fue, más tarde, el fundador de la más importante y perdurable de dichas instituciones médicas renovadoras. En 1880 se creó bajo su dirección el Instituto de Terapéutica Operatoria en el Hospital de la Princesa de Madrid. A pesar de contar con unas instalaciones modestas, se organizó de modo muy exigente. Tenía salas para enfermos hospitalizados y dispensarios con consultas de ortopedia, otología y laringología y, más tarde, de urología, ginecología y otras especialidades. Disponía asimismo de gabinete de electroterapia, de anfiteatro anatómico y de laboratorios de histología y anatomía patológica. Desarrolló una gran labor en la formación de graduados, convirtiéndose, sobre todo, en el auténtico núcleo de cristalización en España del moderno especialismo quirúrgico, gracias a figuras como Rafael Ariza, Eugenio Gutiérrez, Enrique Suénder, etc. Su actividad científica se difundió, primero, gracias a sus *Reseñas* anuales (1881-1885) y, a partir de 1899, a través de la *Revista Iberoamericana de Ciencias Médicas*. En 1896 el Instituto se trasladó desde sus locales en el Hospital de la Princesa a un edificio de nueva planta construido en la Moncloa con fondos procedentes, en su mayor parte, de una suscripción pública. El año anterior, Rubio había fundado en su seno la Escuela de Enfermeras de Santa Isabel de Hungría, que inició la moderna enfermería en España.

Aparte de su papel de promotor de instituciones renovadoras, hay que subrayar la importancia de la labor de Federico Rubio como cirujano práctico. Fue la más brillante de las figuras que, a lo largo del período 1860-1880, introdujeron en España las arriesgadas intervenciones que permitieron la revolución quirúrgica. Anotaremos sólo que en 1860 practicó su primera ovariotomía, dos años después de que iniciara su serie Thomas Spencer Wells; en 1861, su primera histerectomía; en 1874, su primera nefrectomía, y en 1878, la primera extirpación total de la laringe, cinco años después de la efectuada por Theodor Billroth. Prestó gran atención a la hemostasia, a la antisepsia y a las técnicas de anestesia, pero destacó especialmente por su interés hacia la histología normal y patológica y la microbiología, de las que fue uno de los más tempranos cultivadores españoles. Entre sus trabajos histopatológicos, iniciados en 1871, sobresalen los consagrados a los tumo-

res. Recordemos también que, en 1872, expuso la clasificación y el significado etiológico de las bacterias en un trabajo en colaboración con José Eugenio de Olavide, autor con el que realizó, además, investigaciones experimentales sobre diversos parásitos microscópicos.

Como hemos adelantado, Federico Rubio se interesó al final de su vida por las cuestiones médico-sociales. Figuró entre los numerosos profesionales sanitarios de la época que, según Esteban Rodríguez Ocaña, "entendieron que su posición científica les permitía intervenir en el terreno político-moral con criterios higiénicos". A este planteamiento corresponde su discurso *La socio-patología* (1890), así como el libro titulado *La Felicidad. Primeros ensayos de patología y de terapéutica social* (1894), que publicó con el seudónimo de "Doctor Ruderico".

REVISTA IBERO-AMERICANA

DE

CIENCIAS MÉDICAS

PUBLICADA Y DIRIGIDA POR

DON FEDERICO RUBIO Y GALÍ

REDACTOR EN JEFE

DR. LUIS MARCO

TOMO I

(Núms. I y II.—Marzo, Junio).

MADRID

REDACCIÓN Y ADMINISTRACIÓN: INSTITUTO QUIRÚRGICO DE LA MONCLOA

1899

1. El Instituto de Terapéutica Operatoria, o Instituto Quirúrgico de la Moncloa, fundado por Federico Rubio, fue una de las principales instituciones médicas renovadoras de la España de finales del siglo XIX. A partir de 1899 publicó la Revista Iberoamericana de Ciencias Médicas, *de la que se reproduce la portada del primer volumen.*



Los incendios de Yellowstone

Durante el verano de 1988, los incendios asolaron buena parte del parque nacional de Yellowstone. ¿Por qué ardieron tantas hectáreas en un año? La historia ecológica de la región nos ofrece argumentos para la respuesta

William H. Romme y Don G. Despain

El de 1988 fue un verano pleno de acontecimientos en el parque nacional de Yelloswstone. Los incendios, que comenzaron en junio y julio, se fueron adueñando del paisaje en agosto. El 20 de agosto, día que más tarde se recordaría como el sábado negro, ardieron, en un período de 24 horas, más hectáreas de las que se habían quemado durante cualquier década desde 1872. Se perdió el control de la situación; incluso con las mejores técnicas disponibles —y el extraordinario valor y coraje del servicio de bomberos— los incendios siguieron extendiéndose. Sólo con la llegada de las nieves, a mediados de septiembre, los fuegos empezaron a perder su fuerza, aunque no se extinguieron del todo hasta principios de invierno, en el mes de noviembre.

Los funcionarios del parque de Yellowstone están reevaluando la gestión del fuego en los ecosistemas naturales, después de ser objeto de duras críticas por no haberlo extinguido cuando aparecieron los primeros focos (a pesar de que la política vigente era de dejarlos, bajo determinadas condiciones). No resulta sorprendente que los insólitos acontecimientos de 1988 plantearan muchos interrogantes acerca de la historia natural de los incendios forestales y su papel como fuerza de cambio ecológico.

¿Qué provocó la extraordinaria intensidad de los incendios de Yellowstone? ¿Por qué fueron tan extensos y resultó tan difícil su control? ¿Pudieron haberse evitado con ayuda de la intervención humana? ¿Debieron haberse evitado? Los incendios también han cuestionado de forma importante el tipo de gestión del fuego que se necesita en Yellowstone. Una revisión de la cronología del verano nos permitirá abordar estas preguntas.

1. INTENSIDAD VARIABLE de los incendios a medida que avanzan a través del terreno. En algunas zonas queman todo lo que encuentran a su paso; en otras saltan de un grupo de árboles a otro. El resultado puede ser un mosaico cromático, tal y como el que se aprecia en esta fotografía de una ladera del parque nacional de Yellowstone. Parece ser que estos mosaicos reflejan las variaciones locales de humedad y capacidad de combustión, así como los efectos de las variaciones del viento y factores climáticos.

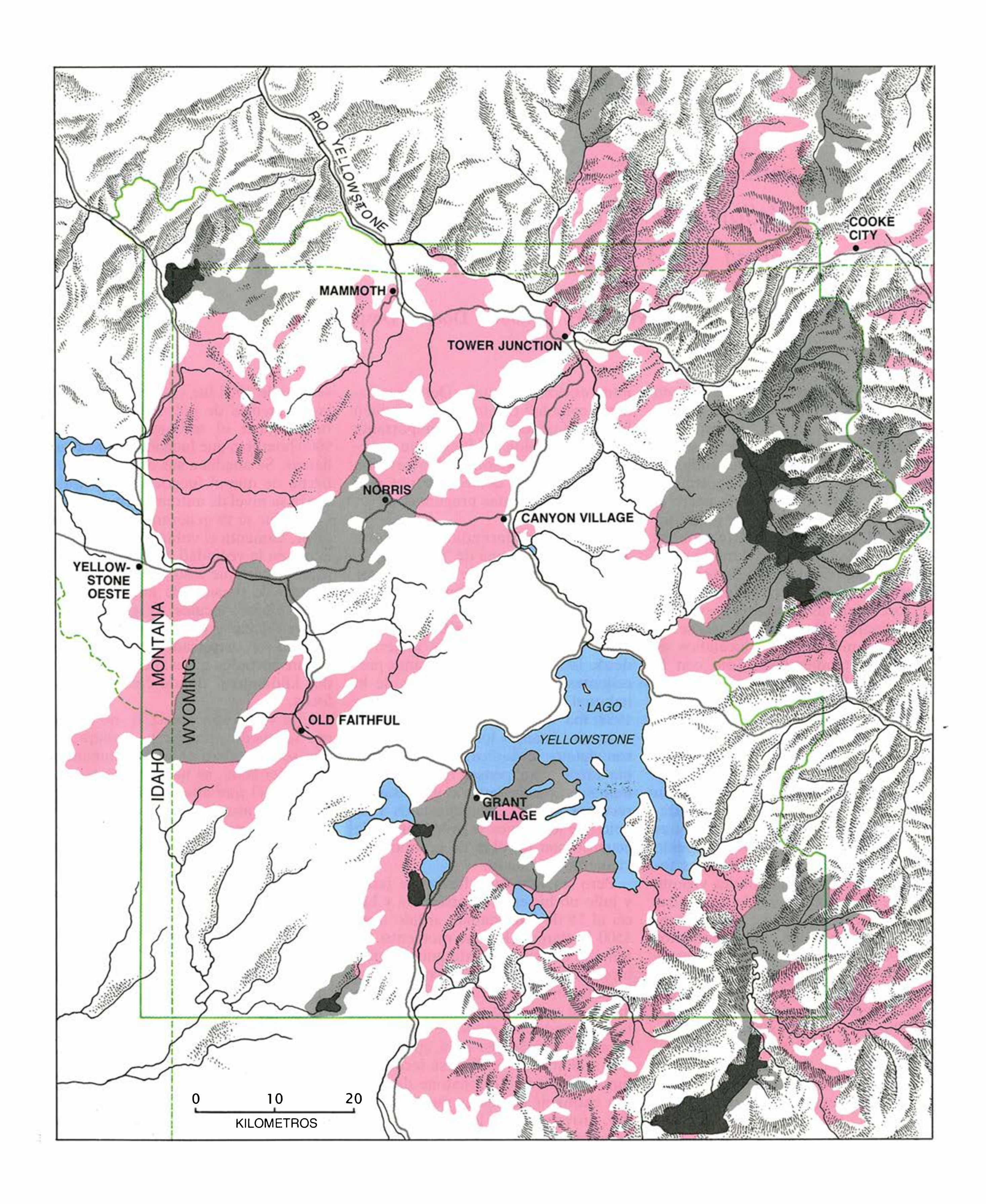
Los primeros incendios en el principal ecosistema de Yellowstone, una región que incluye el parque nacional del mismo nombre y las áreas adyacentes, los produjeron los rayos. El invierno anterior había sido muy seco, igual que todos los inviernos desde 1982, pero los seis veranos precedentes fueron más húmedos de lo habitual y, por tanto, parecía que 1988 iba a seguir la misma pauta. Además, cuando los rayos provocaron algunos incendios en junio no había razón para pensar que las vidas humanas, propiedades o importantes recursos se verían amenazados y se dejó que los fuegos se propagaran, de acuerdo con un plan de gestión previamente aprobado.

Pero las habituales lluvias de junio y julio no hicieron su aparición y hacia el 15 de julio habían ardido unas 3500 hectáreas. En ese momento, se tomó la decisión de extinguir un gran incendio que amenazaba con rebasar el límite sur del parque. El 21 de julio habíanse quemado más de 7000 hectáreas y resultaba evidente que se debían tomar medidas para apagar las que ardían todavía. En esa fecha, los funcionarios de Yellowstone decidieron extinguir cualquier nuevo incendio, provocado por los rayos o por el hombre. El 21 de agosto el número de hectáreas arrasadas por el fuego ascendía a 160.000. ¿Por qué continuó extendiéndose, a pesar de los notables esfuerzos por sofocarlo?

Parece ser que las condiciones meteorológicas constituyeron un factor importante. Vientos de hasta 160 kilómetros por hora se combinaron con la sequía y las altas temperaturas (el verano de 1988 fue el más seco desde las tormentas de polvo de 1930) para bloquear el trabajo de más de 9000 hombres que luchaban contra las llamas. Se añadía a sus dificultades el hecho de que el fuego, al crecer, alcanza su nivel de automantenimiento. Conforme se va generando más y más calor, aumenta el volumen de aire caliente en la vecindad inmediata de un incendio, lo que a su vez genera gradientes de presión de aire que provocan vientos locales. Fragmentos de ramas y acículas de coníferas en combustión son arrastrados por el viento y transportados a distancias de hasta dos kilómetros, donde crean nuevos focos.

Una vez desencadenado, no siempre se puede predecir la manera en que se extenderá el fuego: tomando cualquier zona, se nos ofrece un mosaico en el que alternan manchas de áreas intensamente quemadas con otras ligeramente chamuscadas o que no han ardido. Un mosaico de estas características no sólo refleja varia-

WILLIAM H. ROMME y DON G. DESPAIN han trabajado juntos en diversos proyectos de investigación. Romme pertenece al Fort Lewis College en Durango, Colorado, y ha pasado los últimos 12 veranos en Yellowstone estudiando la vegetación. Está aprovechando su año sabático en el laboratorio nacional de Oak Ridge en Tennessee tratando de validar modelos de ecología del paisaje en colaboración con otros ecólogos. Romme se licenció en química por la Universidad de Nuevo México y es doctor en botánica por la Universidad de Wyoming. Despain ha prestado, durante 18 años, sus servicios de biólogo investigador en el parque nacional de Yellowstone, que constituye el lugar ideal para estudiar los efectos del fuego; cuando no arrecia el frío, pasa la mayor parte de su tiempo en el campo. Se licenció en botánica en la Universidad de Wyoming y obtuvo el doctorado en ecología vegetal por la de Alberta.



2. INCENDIO GENERAL del parque nacional de Yellowstone, ocurrido durante el verano de 1988. La velocidad y extensión del fuego se ha cartografiado con ayuda de datos proporcionados por imágenes de satélite y fotografía aérea. El 21 de julio los incendios todavía eran limitados (*negro*); un mes más tarde, el 21 de agosto, se habían extendido por todo el territorio y su frente se había ensanchado más de lo previsto (*gris*); en un solo día ardieron más hectáreas de las que se habían quemado en cualquier década desde 1872. El 2 de octubre habían ardido más de 300.000 hectáreas dentro de los límites del parque (*rojo*). Aunque el fuego no se propagó mucho más desde principios de octubre, no se extinguió del todo hasta el 13 de noviembre, con la caída de intensas nevadas. Nótese que dentro de cada área quemada hay manchas de vegetación que apenas llegaron a arder.

ciones en la humedad del suelo y del combustible, sino también variaciones del viento y otros factores climáticos que, en conjunto, complican los trabajos de extinción.

Preocupados por la rápida velocidad de avance de los fuegos, el equipo de Yellowstone invitó al parque a varios especialistas para estimar su curso probable durante las semanas siguientes. (Nos hallábamos a principios de agosto.) Con la ayuda de refinados modelos de ordenador y recabando información de fuentes diversas —individuos en el frente del fuego, el servicio meteorológico, mapas de vegetación y proyecciones del comportamiento del fuego bajo condiciones meteorológicas y de combustible conocidas—, los especialistas elaboraron modelos que se suponía que predecían razonablemente la extensión final del área quemada en Yellowstone. Pero agosto vino acompañado de un clima como nadie había vivido en el norte de las montañas Rocosas en el último siglo y los modelos infravaloraron el área total que iba a convertirse en pasto del fuego. Sin caer casi una gota de lluvia, las temperaturas se mantuvieron altas (alcanzando 35 grados o más algunas tardes) y una serie de frentes secos y fríos trajeron fuertes y prolongados vientos.

En estas condiciones, los niveles de humedad en troncos y ramas muertas que, normalmente oscila entre el 15 y el 20 por ciento, descendieron a valores de sólo el 7 por ciento; y, en pequeñas ramas muertas, hasta el 2 por ciento. Se sabe que estos niveles de humedad tan bajos propician los grandes incendios. Por tanto, se modificaron los modelos informáticos sobre el comportamiento del fuego, adaptándolos a las nuevas e inesperadas condiciones. A finales de agosto ardían siete grandes incendios en la región de Yellowstone. En pocos días avanzaron hasta 16 o 20 kilómetros, quemando decenas de miles de hectáreas. Mediado septiembre, cuando el aire comenzó a aclararse, un control visual aéreo de toda el área de Yellowstone reveló que el fuego había afectado una extensión estimada de 600.000 hectáreas, de las que 360.000 pertenecían al parque.

Se ha dicho a menudo que los incendios de 1988 no se hubieran propagado de modo tan incontrolado si se hubieran atacado desde el principio. ¿Hasta qué punto la política de Yellowstone de "dejar arder" fue la causa del comportamiento inusual del fuego? Y si fue así, ¿por qué se había establecido esta política? Para contestar a estas preguntas debemos examinar el problema del control de los incendios desde una perspectiva histórica.

En 1872, cuando se estableció Yellowstone como el primer parque nacional del mundo, el objetivo de la gestión, tal y como se explica en la legislación vigente, era "la preservación de alteraciones o expolio de toda la madera, depósitos minerales, curiosidades naturales o maravillas del parque y su conservación en condiciones naturales". La destrucción de la madera por el fuego se consideraba contraria a los objetivos del parque y a su extinción se le concedió prioridad.

Sin embargo, en los años sesenta, los ecólogos y responsables del parque cuestionaron la importancia de esta medida de protección. Por aquel entonces, los ecólogos empezaban a considerar las perturbaciones naturales, especialmente los incendios, como procesos ecológicos interesantes y significativos por derecho propio. Uno de estos ecólogos fue Dale L. Taylor, quien por aquel entonces estaba en la Universidad de Wyoming y se interesaba por la composición específica de los bosques en diferentes etapas de recuperación tras el fuego. Encontró que la diversidad de especies era máxima en los bosques jóvenes que reemplazaban a bosques que se habían quemado hacía pocos años. Taylor concluyó que la eliminación de incendios en Yellowstone podía traducirse en un empobrecimiento de la vida del parque. También observó que algunas especies parecen prosperar en las condiciones que se generan tras el fuego; por ejemplo, el pájaro carpintero es común en las áreas recién quemadas, donde abundan los insectos xilófagos y los árboles muertos, que resultan adecuados para la nidificación.

El cambio en el pensamiento ecológico a propósito del fuego coincidió con una decisiva declaración hecha pública en 1963 por una comisión encargada del estudio de la gestión de la vida silvestre en el sistema de parques nacionales de EE.UU. El informe Leopold, así denominado por el presidente de la comisión, A. Starker Leopold, se centró explícitamente en el carácter dinámico de los ecosistemas. Según las recomendaciones de los autores, "las asociaciones bióticas en cada parque [nacional] deben mantenerse, o recrearse cuando sea necesario, tan similares como sea posible a las condiciones que prevalecían cuando el área fue visitada por primera vez por el hombre blanco".

Diferentes tipos de observaciones señalaban que el fuego había sido un factor importante para los ecosistemas de Yellowstone. Fotografías tomadas en las postrimerías del siglo XIX, por ejemplo, mostraban bosques jóvenes que medraban entre tocones chamuscados; fotografías tomadas 100 años después en los mismos lugares muestran el crecimiento de bosques más densos y maduros y escasas señales de incendios recientes: especies tales como las coníferas y la artemisa, muy sensibles al fuego, abundaban más en las últimas fotografías, mientras que a otras especies, como los álamos, que crecen bien en áreas recién quemadas, se las veía menos.

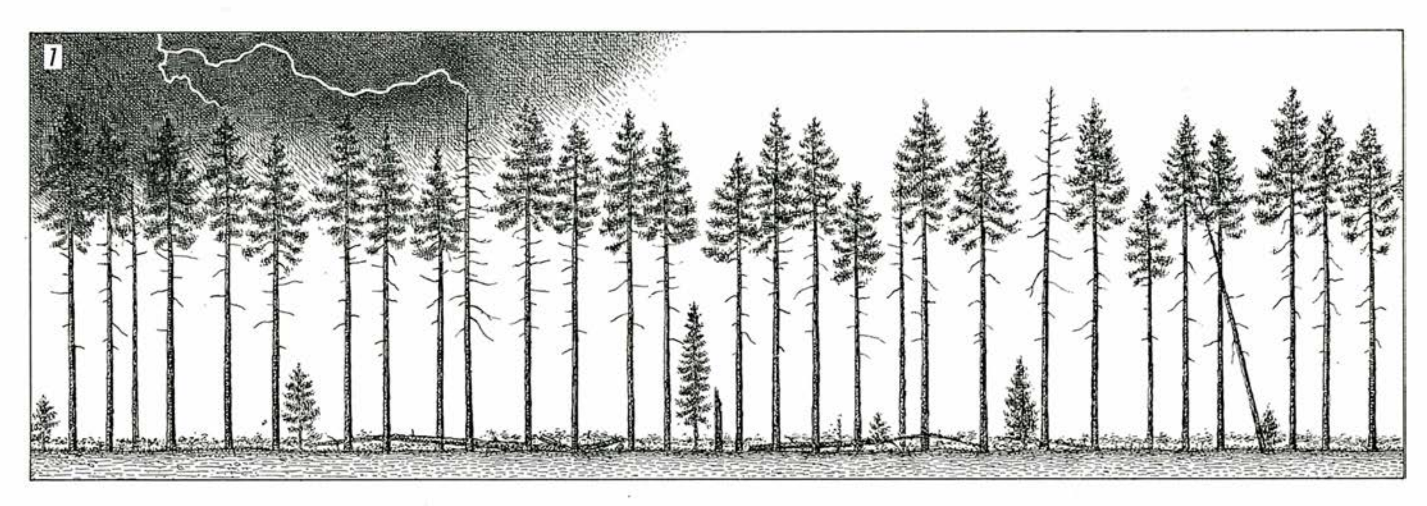
Con la intención de mantener Yellowstone en condiciones naturales, el personal del parque decidió iniciar en 1972 un programa experimental sobre el fuego. Los incendios originados por rayos en áreas remotas se dejaron arder sin interferencia, mientras se extinguían los fuegos en las restantes áreas. Durante los primeros años, el programa cosechó tanto éxito que, en 1976, se decidió ampliarlo a toda la superficie de Yellowstone, con excepción de las áreas habitadas por el hombre, en las que los incendios continuarían apagándose. En las áreas sin desarrollar (un 95 por ciento de la superficie total de Yellowstone), los incendios atribuidos a la actividad humana debían ser prestamente sofocados, lo mismo que los incendios de origen natural que pudieran amenazar la vida, las propiedades o recursos valiosos. Los incendios naturales que no representaran un peligro potencial se dejarían arder bajo estrecha vigilancia.

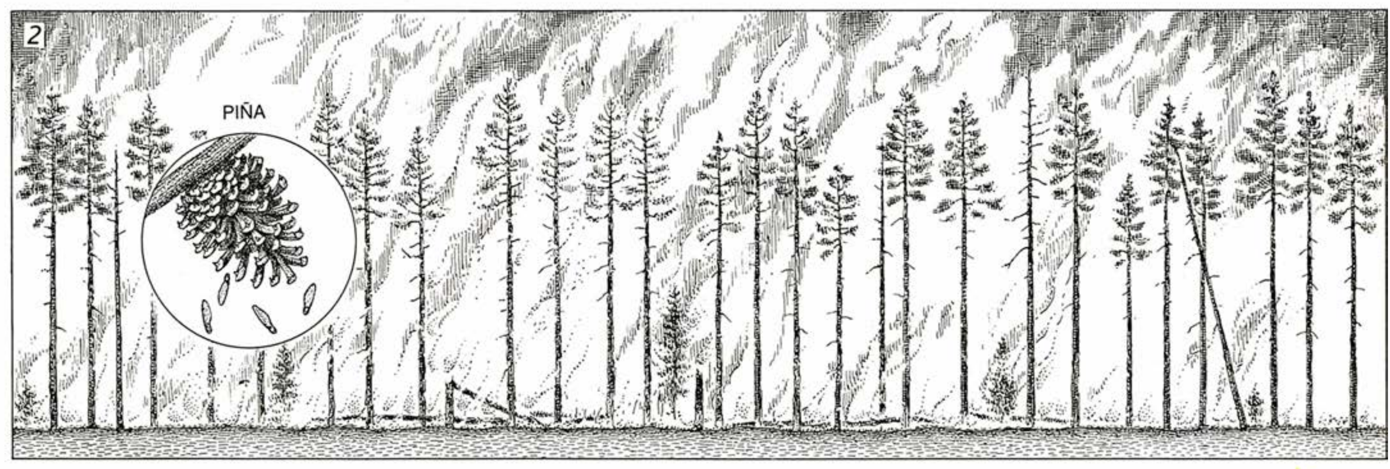
Los originados por rayos que se dejaban arder se designaron con la expresión "incendios naturales prescritos", para indicar que se hallaban dentro de los límites establecidos por el plan de gestión del fuego. Los incendios, de cualquier origen, que representaban un peligro potencial para la vida, las propiedades o los recursos, se denominaron "fuegos salvajes", lo que significaba que ardían al margen de las directrices prescritas y, por tanto, debían sofocarse inmediatamente. El objetivo de las directrices de gestión era reinstaurar el fuego en los ecosistemas de Yellowstone sin olvidar la protección del hombre y los recursos.

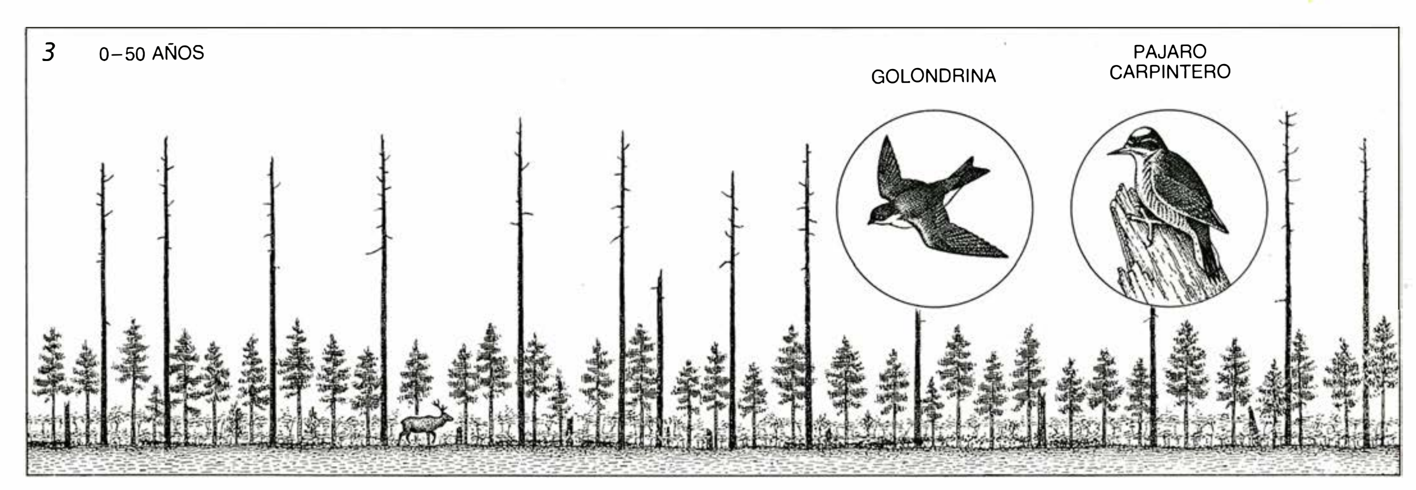
Hasta el verano de 1988, el programa de incendios naturales fue considerado en general como un éxito. Entre 1976 y 1987 unos 235 fuegos originados por rayos se dejaron arder sin contramedida alguna, unos 15 al

año en promedio. La mayoría de los mismos se extinguieron espontáneamente tras quemar no más de 40 hectáreas y sólo ocho arrasaron más de 400. Ni siquiera el incendio más extenso (que quemó 3000 hectáreas en 1981) nunca representó una amenaza para las vidas humanas o los recursos. El fuego era, de nuevo, un proceso natural del ecosistema de Yellowstone.

Ante el aval de éxitos cosechados por el programa, los incendios de 1988 resultaron una sorpresa para casi todos. ¿Eran los fuegos un fenómeno infrecuente natural, o eran el resultado de un comportamiento humano descuidado y de una gestión precaria? Algunos ecólogos han sugerido que la gestión del fuego en el parque, si no errónea, resultaba, al menos, poco elaborada. La investigación desarrollada en otros parques nacionales (por ejemplo, Kings Canyon, Sequoia y Yosemite) indicaban que la supresión de los fuegos durante largos períodos, es decir, de 100 años o más, en eco-



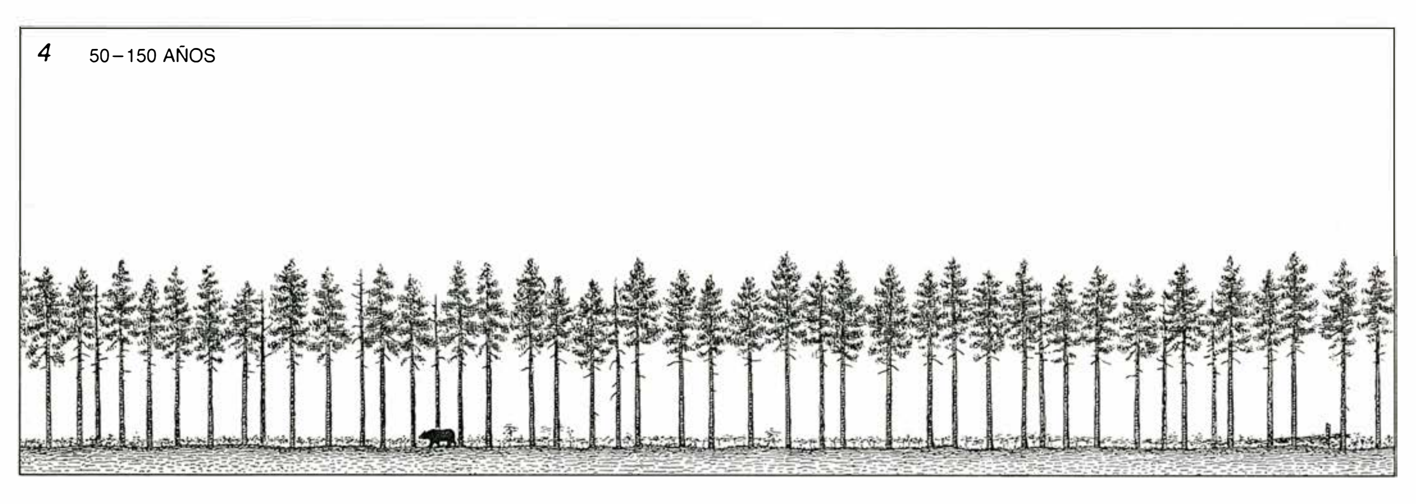


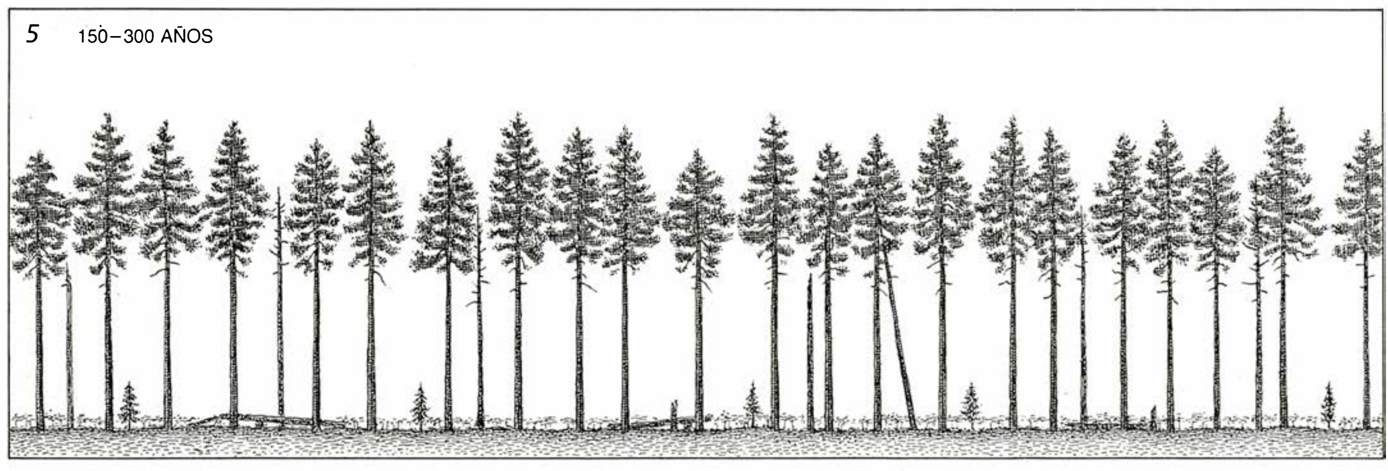


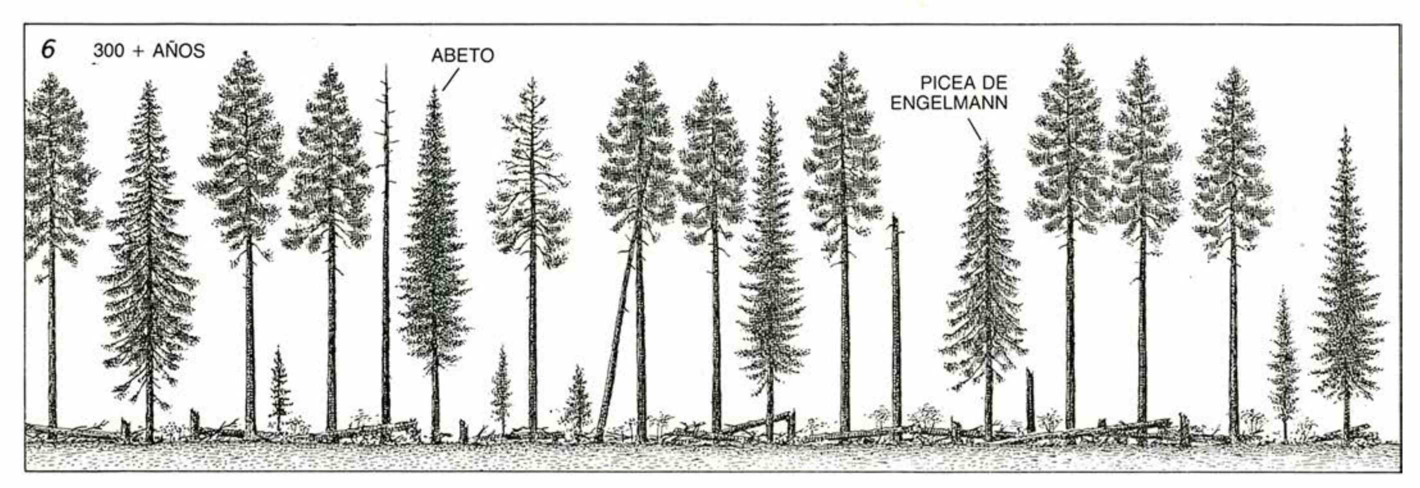
3. DIVISION DE LA SUCESION ECOLOGICA en etapas. Una tormenta eléctrica ha descargado en un bosque maduro de Yellowstone, compuesto por pino contorto, abetos y píceas de Engelmann (*1*). Si el consiguiente incendio adquiere notables proporciones (*2*), se destruye la mayor parte de la vegetación. Las piñas protegen a las semillas durante el incendio, tras el cual se abren y las liberan, germinando al tiempo que rebrotan las raíces de algunas plantas herbáceas y se desarrollan las semillas de otras, iniciándose así la primera etapa de la sucesión (*3*). Durante ésta, el bosque abierto cobija muchas especies, incluidas golondrinas, pájaros carpinteros y alces. Las plántulas del pino crecen hasta 5 o 6 metros. Transcurridos

sistemas que, de otro modo, hubieran ardido a intervalos de 10 o 20 años, podía conducir a la acumulación de cantidades anormales de combustible en forma de árboles y de matorrales en el subsuelo. Estas conclusiones sugerían la conveniencia de reducir el combustible mediante fuegos prescritos, antes de permitir que se propagaran los incendios provocados por la caída de un rayo. ¿Era necesario este programa de reducción de combustible en Yellowstone? La pregunta —que es muy importante— puede responderse, al menos en parte, estudiando la historia de los incendios en Yellowstone.

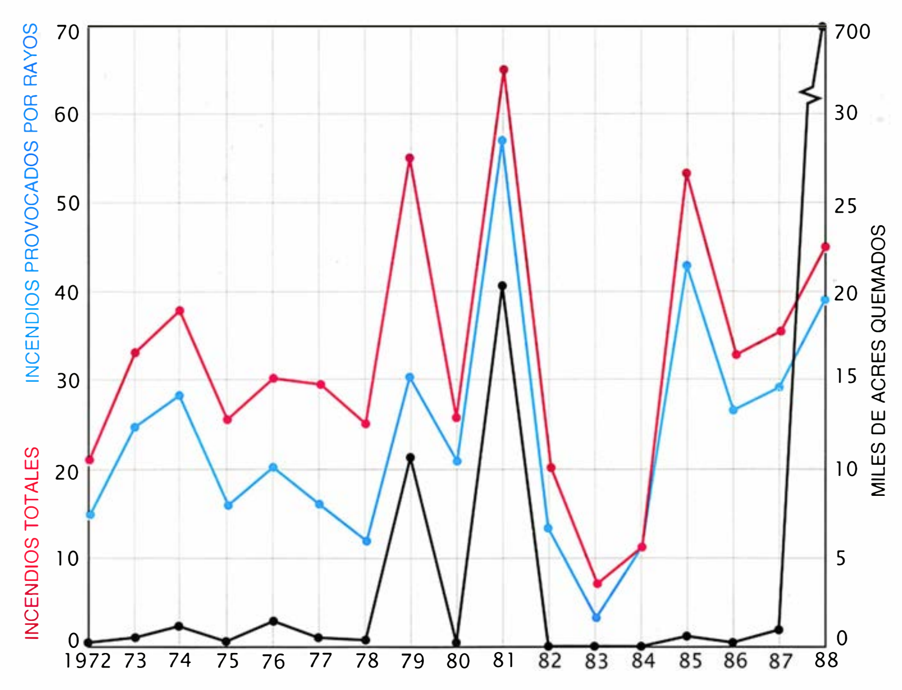
Douglas B. Houston, ecólogo del parque nacional de Yellowstone, ha estudiado la historia del fuego en sus áreas de poca elevación. La vegetación en estas regiones consiste principalmente en prados de artemisa que alternan con bosques de pinos y álamos; sauces y juncos son característicos de las riberas de los cursos de agua. Analizando las cicatrices pro-







unos 50 años, el bosque entra en su segunda etapa de la sucesión (*4*), que se prolonga unos 100 años. Los pinos alcanzan alturas de 10 a 20 metros y forman masas densas que filtran la luz solar. En la tercera etapa (*5*), que se inicia hacia los 150 años y dura otros cien, los pinos contortos se van sustituyendo por una segunda generación de árboles: la pícea de Engelmann o abetos. El incremento de la insolación estimula el crecimiento de la vegetación en el estrato herbáceo. En la última etapa (*6*), cuando el bosque alcanza una edad de unos 300 años, mueren los árboles originales y aparecen grandes claros. Se acumulan árboles jóvenes y ramas muertas; el bosque, ahora muy inflamable, resulta, de nuevo, vulnerable al fuego.



4. NUMERO E INTENSIDAD de los incendios en una región; varían de año en año a tenor de las condiciones meteorológicas reinantes (temperatura, viento, sequía) y la etapa de la sucesión en la que se encuentra el bosque. Se indica la variación anual, desde 1972 a 1988, del número total de incendios (*rojo*), el número de hectáreas quemadas (*negro*) y el número de incendios provocados por rayos y designados como fuegos prescritos naturales (*azul*), en el parque nacional de Yellowstone. Aunque el número de incendios a lo largo del año 1988 no resultó anormalmente alto, ardieron durante el verano del mismo más hectáreas que las que se habían quemado en cualquier década desde 1872, cuando empezaron los registros sistemáticos de esos episodios. (Un acre equivale a 0,404 hectáreas.)

vocadas por el fuego en los árboles, Houston reconstruyó la historia del fuego en la zona. Las cicatrices aparecen en la parte del tronco en que se destruye el cámbium o capa de células que forman los anillos de crecimiento. Estas cicatrices cuneiformes se extienden verticalmente a lo largo del tronco y alcanzan de medio a cinco metros; resultan bastante características. En las regiones incólumes del tronco se siguen formando los anillos anuales, lo que permite contarlos y calcular en qué año ocurrió el incendio. El procedimiento implica cortar una sección transversal de la circunferencia del árbol y contar, con ayuda del microscopio, los anillos de crecimiento. Las cicatrices del fuego se producen sólo en los árboles expuestos al fuego sin llegar a morirse y, por tanto, no abundan. A pesar de ello, Houston logró reunir árboles marcados en número suficiente para reconstruir la historia de los incendios en su área de estudio. Encontró que (antes del siglo xx, cuando entró en vigor la política de extinción de incendios) los fuegos se repetían en cada área cada 20 o 25 años en promedio, aunque el intervalo variaba desde períodos muy cortos, de dos años, a otros muy largos, de 90.

Estudiamos la historia de los incendios a mayor altitud, donde el clima es más frío y húmedo y donde predominan las coníferas. Encontramos una situación absolutamente diferente de la descrita por Houston para las zonas bajas. Nuestra área de estudio abarcaba 130.000 hectáreas en la sección centro-sur de Yellowstone. Analizando las cicatrices dejadas por el fuego, determinamos que los incendios se habían producido en distintos puntos de la zona cada década desde, por lo menos, 1690. Aunque la mayoría fueron de escasa relevancia, hubo algunos importantes que se desarrollaron en momentos clave: de 1690 a 1709, período en el que ardió el 19 por ciento del área estudiada; de 1730 a 1749, en el que se quemó el 15 por ciento; de 1850 a 1869, en el que ardió el 9 por ciento y, finalmente, en 1988, en que se llegó a quemar el 28 por ciento del área.

¿Por qué se han producido tan pocos incendios importantes en un período que cubre casi 300 años, desde los inicios de 1700 hasta el verano de 1988? ¿Por qué estos pocos incendios resultaron tan espectaculares? Las respuestas están relacionadas, al menos en parte, con la naturaleza de la sucesión de los ecosistemas.

En los bosques jóvenes, en las primeras etapas de la sucesión, predominan las plantas herbáceas y pinos jóvenes; abundan los árboles muertos (en pie y caídos). Los pinos, de la especie *Pinus contorta*, germinan durante el primer año después del fuego y llegan a alcanzar una altura de 2 metros en 10 años y de 6 a 10 metros cuando las copas se cierran, lo que indica que la primera etapa de la sucesión está llegando a su fin. La diversidad de especies es alta durante este primer período, que dura unos 50 años. La vegetación del sotobosque se mantiene verde y húmeda durante la época de incendios y los árboles están dispersos, lo que impide la propagación del fuego; y el bosque, en su conjunto, resulta poco inflamable.

Durante la siguiente etapa, los pinos forman masas densas cuya altura oscila entre los 10 y los 20 metros. La muerte natural de los árboles (denominada autotala) se produce a medida que los árboles van creciendo, como resultado de la competencia por la luz, el agua y los nutrientes. La vegetación herbácea se encuentra más dispersa y la diversidad específica es baja, en buena parte porque las ramas superiores bloquean una porción importante de la luz solar impidiéndole alcanzar el suelo. Esta etapa se inicia unos cincuenta años después del fuego y dura un siglo. Aunque empiezan a acumularse troncos en descomposición y arbustos muertos, las copas quedan suficientemente alejadas del suelo como para ser fácilmente alcanzadas por el fuego desde abajo, por lo que la segunda etapa, al igual que la primera, no resulta muy inflamable.

En la tercera etapa, los pinos son menos densos, la vegetación herbácea es más abundante y empieza a crecer una nueva generación de pinos. Pueden aparecer otras especies arbóreas, entre ellas, el abeto *Abies lasiocarpa* y la pícea de Engelmann, *Picea engelmannii*, dependiendo de las condiciones del hábitat y de la altitud. Esta etapa empieza generalmente unos 150 años después del fuego y dura un siglo. El sotobosque permanece verde durante la mayor parte del período de riesgo de incendio, de manera que cuando éste se produce tiende a propagarse lentamente. Durante la última fase de esta etapa, sin embargo, un estrato de pequeños árboles proporciona un lecho de combustible desde donde el fuego puede alcanzar la bóveda arbórea.

En la última etapa de la sucesión, los pinos originales, que pueden tener ya 300 años o más, comienzan a morir, creando una bóveda irregular con abundantes claros. Los árboles jóvenes, que aparecieron durante la etapa

anterior, crecen aprovechando los claros y, en consecuencia, cambian la composición específica del lugar. El bosque resulta bastante inflamable durante esta etapa: en el estrato arbustivo proliferan los árboles jóvenes, abunda el combustible acumulado por las distintas especies y se extienden hacia el suelo las copas inflamables de la pícea y del abeto, creando condiciones propicias para la expansión del fuego hasta las copas. Finalmente, tras dos o tres siglos, la vegetación de las áreas quemadas se parecerá de nuevo a la vegetación que poblaba la zona antes del incendio. Mientras tanto, arderán otras áreas, creándose así un mosaico de bosques (con su vida silvestre asociada) en diferentes etapas de la sucesión.

Teóricamente, en ausencia de fuego, los pinos que colonizan inicialmente el lugar mueren y el bosque pasa a estar constituido sólo por abetos y píceas. En este nivel, el bosque habrá alcanzado la etapa final de la sucesión, o clímax. Tales masas, sin embargo, son virtualmente inexistentes en Yellowstone, ya que la mayoría arde antes de alcanzar la etapa clímax.

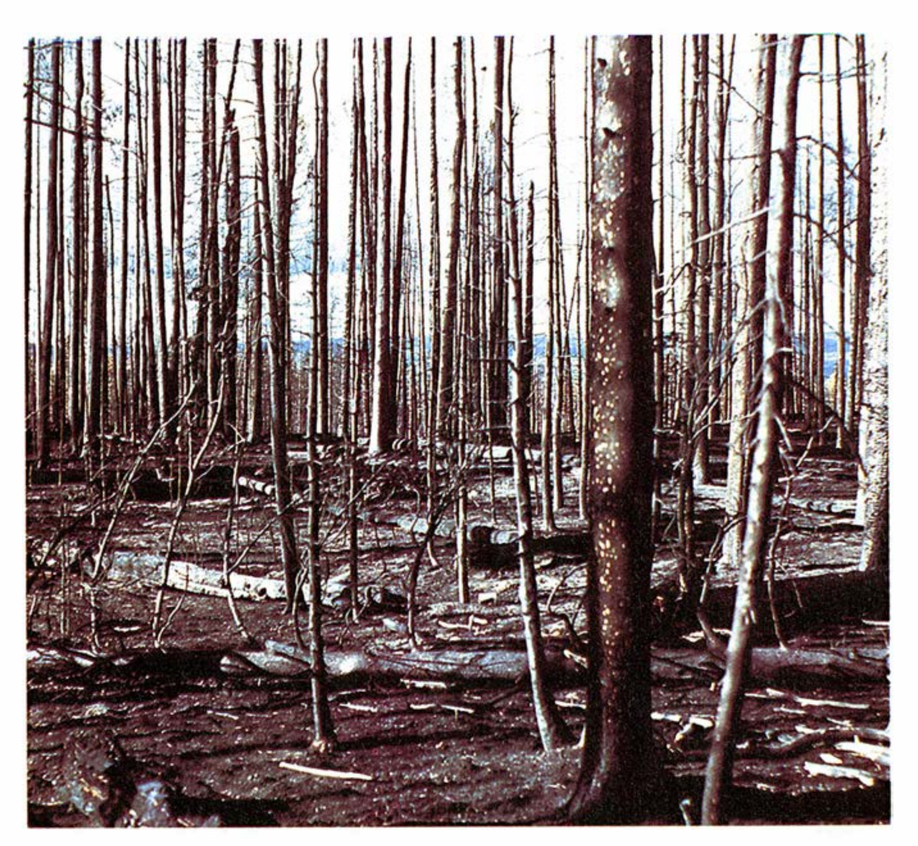
Los bosques de Yellowstone se caracterizan por hacerse más inflamables a medida que van madurando. Cuando los rayos caen sobre los bosques jóvenes, pueden provocar incendios que arden sin llama en el suelo durante varias semanas; ahora bien, sin un aporte abundante de combustible, estos fuegos acabarán extinguiéndose antes de causar daños reseñables. Por el contrario, la acumulación de pequeños árboles y materia muerta de otras plantas en bosques maduros propicia el fuego de copas. Nuestros estudios nos permiten afirmar que los rayos han originado incendios en Yellowstone cada año, si bien, cuando el territorio está ocupado por bosques jóvenes, como ocurría en el siglo XVIII y comienzos del XIX, los incendios alcanzan proporciones limitadas y causan escaso impacto.

Nuestro estudio demostró también que, hacia el comienzo del siglo XX, la mayor parte del área quemada a principios del XVIII iniciaba la etapa de madurez de la sucesión. Hacia 1930 o 1940, el número de hectáreas cubiertas por bosques maduros e inflamables superaba la existente en cualquier momento de los 250 años precedentes. Llegados a ese punto, los grandes incendios eran inevitables. ¿Por qué, pues, tardaron tanto tiempo en producirse? Según parece hay que buscar la causa en la combinación de unas condiciones meteorológicas insólitas y las estrategias entonces vigentes de extinción de incendios.

El clima es un poderoso determinante del comportamiento del fuego. En un verano normal, la mayor parte de Yellowstone almacena demasiada humedad para arder y la mayoría de incendios, incluidos los que se producen en bosques maduros, se extinguen rápidamente. Ni siquiera con veranos secos el fuego alcanza a quemar grandes extensiones. Aunque pueda mantenerse en estado latente hasta octubre, raramente llega a reavivarse. En los años secos de 1976, 1979 y 1981, por ejemplo, sólo ardieron 650, 4500 y 9000 hectáreas, respectivamente. El viento constituye, a su vez, un factor decisivo de las proporciones del incendio. Un año como 1988, con su combinación única de sequía y vientos fuertes y sostenidos, sólo se produce quizás una vez cada cien años. Cuando estas condiciones climáticas coinciden con un territorio que está cubierto por bosques maduros e inflamables, la coyuntura propicia un incendio generalizado.

Las estrategias de extinción y su relación con los incendios de 1988 son más difíciles de evaluar. A baja altitud, y en particular a lo largo de carreteras y caminos, la política de extinción puede haber contribuido a un incremento del área cubierta por coníferas y artemisas y, por tanto, al incremento del carácter inflamable de la zona. La eficacia de las medidas de extinción a altitudes altas, a las que corresponde el 80 por ciento del parque, es menos clara. Antes de 1940, los esfuerzos por combatir el fuego en las regiones elevadas y remotas resultaron quizá bastante infructuosos. Una vez que un incendio adquiría la magnitud necesaria para ser detectado, se necesitaban varias horas o incluso un día para llegar hasta el mismo, tiempo suficiente para que el fuego se hubiera extinguido por sí solo o se hubiera desarrollado tanto que hiciera vanos los intentos de atajarlo por medios manuales. Muy probablemente muchos incendios se extinguieron antes incluso de ser detectados.

La situación cambió de manera notable después de la segunda guerra mundial, con el advenimiento de técnicas más refinadas para la detección y la lucha contra el fuego: patrullas aéreas, hidroaviones, aviones modificados que transportaban grandes cantidades de retardantes químicos y bomberos lanzándose en paracaídas desde aviones y que accedían inmediatamente al foco del incendio. Aunque la política de extinción ganó en eficacia, se practicó sólo durante un



5. EFECTOS de los incendios de 1988. Nos muestran un bosque de árboles ennegrecidos, desprovisto de vida aparente. El suelo está cubierto por una capa de cenizas, que actúa de fertilizante para las plantas que aparecerán al año siguiente, cuando germinen las semillas o rebroten las raíces enterradas.



6. LAS FLORES han brotado tras los fuegos de Yellowstone. La adelfilla y otras especies herbáceas son, a menudo, las primeras en aparecer en una mancha de bosque húmedo recién quemado. Su presencia indica que se ha iniciado la primera etapa de la sucesión; los lugares más secos y menos fértiles pueden tardar de tres a cinco años hasta alcanzar los niveles de las zonas más fértiles.

período de tiempo limitado: desde los años cuarenta hasta la entrada en vigor de las nuevas directrices de gestión en la década de los setenta.

Nuestra conclusión es que los incendios de 1988 representaron acontecimientos más o menos naturales en la historia ecológica del parque nacional de Yellowstone, perturbaciones que suelen ocurrir una vez cada 200 o 300 años. Los datos de nuestra área de estudio indican que los incendios de 1988 no se comportaron de modo muy diferente de como lo hicieron los incendios acaecidos en la misma área hacia 1700.

Parece que las condiciones climáticas del verano de 1988, anormalmente secas, cálidas y con viento, coincidieron con múltiples focos de fuego en un bosque que se encontraba en la etapa sucesional de máxima capacidad de combustión. Sin embargo, parece improbable que los esfuerzos de supresión del fuego del pasado constituyeran un factor principal en estos impresionantes incendios de Yellowstone.

Si se producen de forma natural a intervalos de dos a cuatro siglos, 30 o 40 años de medidas eficaces de extinción constituyen un tiempo demasiado corto para que el bosque de Yellowstone acumule cantidades importantes de combustible. Los mayores esfuerzos empeñados en la sofocación pudieron, como mucho, retrasar lo inevitable.

Aunque vistos desde una perspectiva histórica los incendios de 1988 no suponen un episodio singular, proporcionan a los biólogos una oportunidad sin precedentes para estudiar las perturbaciones ecológicas de gran escala. El parque nacional de Yellowstone, que se gestiona como un área natural, representa un enclave apropiado para comprobar los efectos del fuego sobre las comunidades biológicas a corto y largo plazo.

Los animales grandes, como el alce y el bisonte, no parecen haber sufrido graves quebrantos durante los incendios: se limitaron a huir de la zona interesada. Sólo se registró la muerte de 350 alces y 9 bisontes de un censo que se eleva a más de 30.000 y 2500 cabezas, respectivamente. Los animales que perecieron fueron víctimas de inhalaciones de humo durante unos pocos días clave, a principios de septiembre, cuando los frentes de los incendios se desplazaban a increíbles velocidades, de 16 kilómetros al día o incluso superiores. Los halcones y otras especies se vieron, por contra, favorecidos: en vuelo por encima mismo de las llamas podían cazar pequeños animales que abandonaban sus hábitats.

Desde una perspectiva a largo plazo, animales y plantas son apostantes en el juego de la sucesión. Los insectos y otros invertebrados colonizan los árboles muertos en cuanto el bosque se enfría. Los ciervos retornan más o menos al mismo tiempo, seguidos por los pájaros, muchos de los cuales anidan sin distinción en los bosques chamuscados y en los intactos. Los pájaros carpinteros vuelven buscando abundantes coleópteros y otros insectos que viven bajo la corteza y en la madera de los troncos; las golondrinas vienen a anidar en los agujeros excavados por los pájaros carpinteros. A medida que aumenta la densidad de la cubierta herbácea, estimulada por los nutrientes del suelo y la luz del sol, van llegando osos y alces para comer las plantas y los insectos que proliferan.

Tras un incendio, la respuesta de las plantas, a corto y largo plazo, es similar a la de los animales. Si el fuego no es muy intenso, mueren pocas plantas y la comunidad recupera su estado previo al incendio en un período de tres a cinco años. Cuando el incendio de la bóveda arbórea es más intenso, desaparece a menudo todo rastro de vegetación sobre el suelo. En muchos casos, empero, sobreviven bajo la superficie estructuras reproductoras: raíces, rizomas y semillas; en consecuencia, muchas hierbas y arbustos bajos crecen vigorosamente tras el fuego, incluso durante la misma estación en algunas ocasiones. Los árboles, en cambio, no rebrotan y son eliminados por el fuego, con la notable excepción del álamo.

Algunas hierbas y arbustos son más vigorosos y fecundos tras el incendio, momento en el que la competencia por la luz, el agua y los nutrientes es mucho menor. En determinadas situaciones, las llamadas malas hierbas pueden responder a las condiciones de competencia reducida estableciéndose en zonas donde antes no medraban.

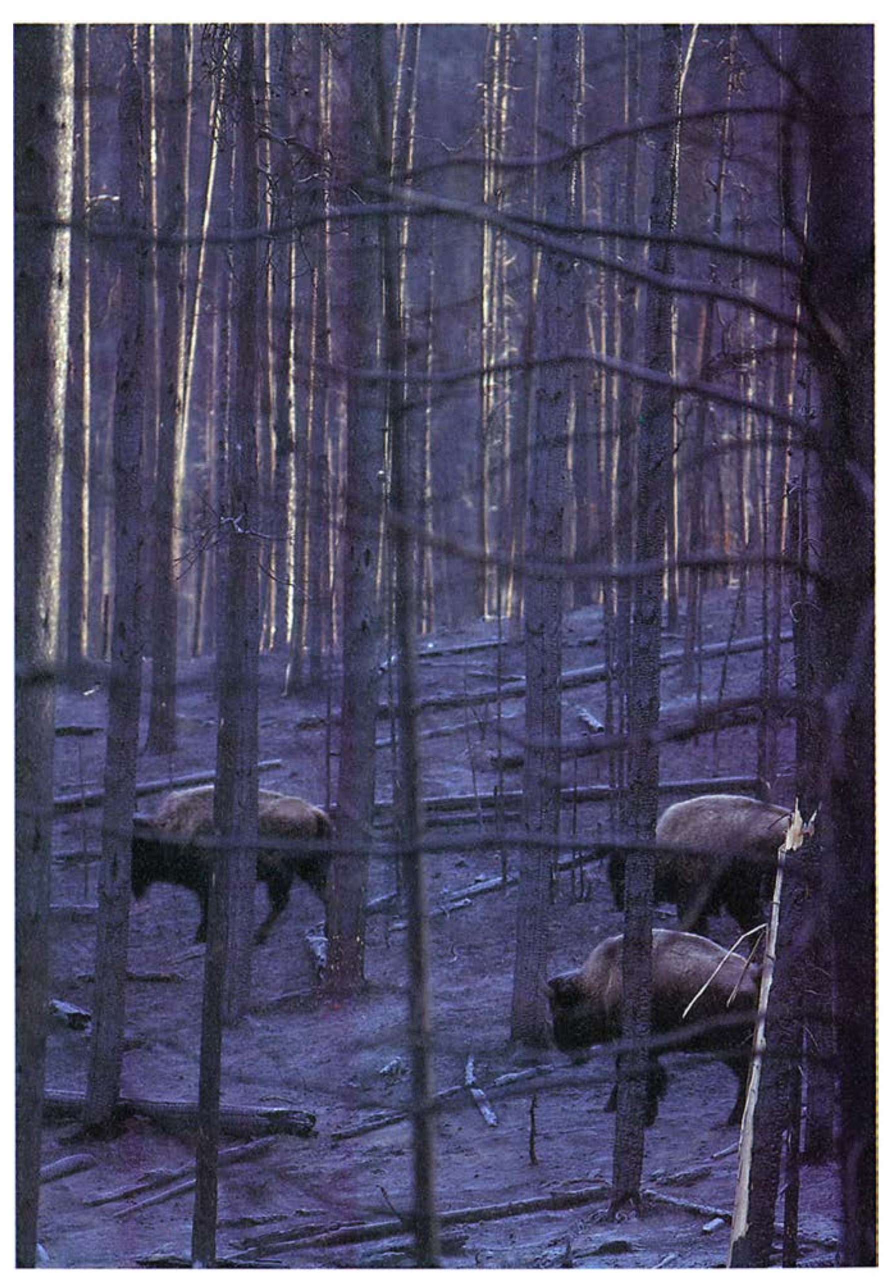
El comportamiento del pino contorto ofrece especial interés. Aunque se desarrolla de semillas, algunas piñas permanecen cerradas durante la madurez y sólo se abren y liberan sus "piñones" a raíz del incendio. El fuego crea unas condiciones ideales para estas semillas, que parecen crecer mejor en espacios abiertos, bien iluminados, donde la competencia de otras especies es mínima.

Además, el incendio supone un profundo impacto sobre el ciclo de los nutrientes en la comunidad. El nitrógeno, el fósforo y el calcio, nutrientes que suelen hallarse secuestrados en la materia orgánica, se liberan al arder ésta. Sin embargo, lejos de perderse para el ecosistema, tienden a permanecer gracias a la actividad biológica. Las bacterias, los hongos y otros microorganismos del suelo incrementan sus tasas de consumo de nutrientes en respuesta ante su mayor disponibilidad; además, las temperaturas, aumentadas con la absorción de calor del suelo ennegrecido y la supresión de la sombra, contribuyen también al incremento de la actividad metabólica de los organismos del suelo, lo que fomenta aún más la tasa de consumo de nutrientes.

Un segundo mecanismo de conservación de nutrientes, que estudian Samuel J. McNaughton, de la Universidad de Siracusa, y Linda L. Wallace, de la Universidad de Oklahoma, se refiere al salto que se produce en la composición específica de la comunidad; pasa ésta de una situación en que predominan las especies leñosas a una comunidad donde dominan las plantas herbáceas. Las plantas herbáceas tienden a absorber y a reciclar los nutrientes con mayor rapidez que las plantas leñosas. En consecuencia, las hierbas que predominan en un área quemada acumulan nutrientes rápidamente. El ciclo de los nutrientes se acelera además por la intervención del alce y del bisonte, que comen estas hierbas y las devuelven en forma de excrementos.

Los nutrientes que se pierden con el agua de escorrentía superficial pueden ser interceptados por la vegetación de los cursos de agua, tales como los sauces o los juncos. Las zonas húmedas escapan con frecuencia al fuego, porque están encharcadas, pero incluso cuando estas áreas llegan a arder, la vegetación tiende a regenerarse enseguida. De acuerdo con G. Wayne Minshall, de la Universidad estatal de Idaho, el flujo de nutrientes en un curso de agua tras un incendio, combinado con un incremento de la temperatura e insolación del agua, conduce a un incremento general de la actividad metabólica de los organismos acuáticos, disparándose así la productividad de esas comunidades. A largo plazo, estos influjos periódicos de nutrientes pueden contribuir a sostener las poblaciones de algas que constituyen una base importante de la cadena alimentaria de los lagos. Un incremento de las algas permite poblaciones mayores de zooplancton, que a su vez sirven de alimento a las truchas, de las que se alimentan los pelícanos, águilas pescadoras, osos y otros animales depredadores.

Ante los incendios de Yellowstone de 1988, cabe preguntarse qué cambios deben introducirse en los programas de control del fuego, si es que debe de introducirse alguno. En el otoño de 1988 se encargó a dos equipos independientes de científicos y gestores una evaluación de la política de extinción y de otros aspectos de la gestión del fuego en Yellowstone. El equipo de revisión de la política de gestión del fuego, comisionado por las secretarías de Agricultura y de Interior, estaba compuesto por diez personas que representaban a los departamentos federales de gestión del territorio y la asociación estatal de recursos forestales. Su informe final (que lleva el nombre de Philpot-Leonard, en referencia a Charles Philpot y Brad Leonard, quienes codirigieron el equipo) se entregó el 20 de diciembre de 1988. El segundo equipo, comisionado por el Servicio de Parques Nacionales, se denominó: Panel de evaluación ecológica del fuego del área de Yellowstone. Estaba formado por trece personas, procedentes en su mayoría del mundo de la investigación en ecología y limnología. Sus conclusiones se presentaron



7. LOS VERTEBRADOS HERBIVOROS, como el bisonte que vive en el parque nacional de Yellowstone, se encuentran entre los primeros animales que invaden el bosque después de un incendio. Vienen a alimentarse de las hierbas que, a menudo, crecen vigorosamente tras un fuego intenso.

en el informe Christensen, así llamado en alusión a Norman L. Christensen, de la Universidad de Duke; se libró al Servicio de Parques Nacionales el 15 de abril de 1989.

Ambos grupos llegaron a la conclusión de que un programa de esa índole, en el que los incendios causados por los rayos se dejaran arder bajo ciertas condiciones, resultaba apropiado y necesario para mantener el valor de la vida silvestre en los parques y otras zonas protegidas. Sin embargo, el informe Christensen señalaba que, a diferencia del pasado, cuando los fuegos se movían a sus anchas por Norteamérica, las áreas naturales que todavía permanecen son muy escasas y, en consecuencia, no se puede dejar la naturaleza a su libre merced. Aunque pudieron desarrollarse grandes incendios en el pasado, este hecho, por sí solo, no los hace aceptables hoy en día.

El informe Philpot-Leonard pone el acento en los riesgos que suponen los incendios para las comunidades situadas más allá de los límites del parque. Los incendios de Yellowstone de 1988 causaron graves trastornos a los residentes y los visitantes del parque. Muchos no pudieron acudir a Yellowstone como tenían proyectado y quienes lo hicieron se encontraron con caminos cortados y panorámicas veladas por el humo. Algunos de los negocios de las comunidades del "cinturón" —las poblaciones aledañas a la reserva, en las que el turismo es uno de los ingresos fundamentales— padecieron la cancelación de las visitas. El humo no sólo afectó a la visibilidad en el área, sino que planteó también problemas sanitarios a los residentes de las comunidades próximas, en las que se excedieron los niveles contemplados en el acta federal de calidad del aire.

¿Deben sofocarse todos los incendios causados por rayos y provocar otros en determinados lugares y momentos? Ambos grupos recomendaron que se estudie la conveniencia de quemar áreas desarrolladas (para reducir la cantidad de combustible y, por tanto, el riesgo de incendio). No aconsejaron la sustitución de fuegos naturales en áreas silvestres por fuegos provocados. En primer lugar, las técnicas y experiencia para acometer tales programas con seguridad no han alcanzado un grado suficiente de desarrollo. Los fuegos intensos de copas pueden evolucionar de forma incontrolada con mucha facilidad y los incendios de poca intensidad no simulan adecuadamente los fuegos de importancia histórica que afectan al ecosistema. Queda, además, mucho por conocer sobre el papel ecológico

del fuego para que pueda reproducirse con precisión. En particular, se ignora la importancia del tamaño del incendio. ¿Equivalen muchos incendios pequeños a otro grande? Los ecólogos han empezado ya a plantearse con seriedad esa cuestión.

Al idear estrategias de gestión conviene tener en cuenta que el primer parque nacional y uno de los mayores del mundo, Yellowstone, está siempre presente en la opinión pública. Valga como testiminio la cobertura de la prensa durante el verano de 1988. Frente a las 300.000 hectáreas que se quemaron en Yellowstone, ardieron más de 800.000 hectáreas en los Estados Unidos y, en Alaska. 900.000 hectáreas; pues bien, Yellowstone absorbió la mayoría de los titulares. Tal vez el énfasis sobre Yellowstone fue fortuito, porque los problemas que plantea son representativos de los retos a los que se enfrentan todos los parques nacionales y zonas de reserva. Sin embargo, no puede decirse que los informes de los medios sensacionalistas que, lejos de esclarecer los rasgos importantes, refuerzan las actitudes erróneas, estén al servicio de la opinión pública.

Tal vez la lección principal que se desprende del verano de 1988 sea una reafirmación del hecho obvio. pero a menudo olvidado, de que la naturaleza es compleja, sutil y no siempre fácilmente controlable. Una de las virtudes irreemplazables de las áreas naturales es que proporcionan un lugar donde se pueden conocer los rasgos fundamentales de cómo opera la naturaleza. La investigación tras los incendios de Yellowstone nos ayudará a entender mejor los procesos ecológicos responsables de la diversidad e integridad de esa zona de valor incalculable.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WILDFIRES IN NORTHERN YELLOWSTONE NATIONAL PARK. Douglas B. Houston en *Ecology*, vol. 54, n.º 5, págs. 1111-1117; verano de 1973.

SOME ECOLOGICAL IMPLICATIONS OF FOREST FIRE CONTROL IN YELLOWSTONE NATIONAL PARK, WYOMING. Dale L. Taylor en *Ecology*, vol. 54, n.º 6. págs. 1394-1396; otoño de 1973.

FIRE HISTORY OF A SEQUOIA-MIXED CONIFER FOREST. Bruce M. Kilgore y Dan Taylor en *Ecology*, vol. 60. n.º 1, págs. 129-142; febrero de 1979.

LANDSCAPE DIVERSITY: THE CONCEPT APPLIED TO YELLOWSTONE PARK. William H. Romme y Dennis H. Knight en *bioscience*, vol. 32, n.º 8, págs. 664-670; septiembre de 1982.

YELLOWSTONE VEGETATION. Don G. Despain. Roberts Rinehart, Inc., Publishers, en prensa.

La desintegración beta doble

El futuro de las teorías fundamentales que explican desde los elementos constituyentes del átomo hasta la arquitectura del cosmos depende de los estudios sobre esta desintegración, el más raro de los sucesos radiactivos

Michael K. Moe y Simon Peter Rosen

La naturaleza se burla de nosotros con sus secretos más íntimos. Lanza una pista para cautivar nuestro interés y luego siembra el camino de obstáculos y señuelos. Tras seguir uno de estos rastros tortuosos durante cinco décadas, los físicos experimentales se han alzado con el triunfo al detectar la huella de la desintegración beta doble, el más raro de cuantos sucesos radiactivos se hayan jamás observado en el laboratorio. El estudio de la desintegración beta doble ilumina el destino y la estructura del universo.

En un suceso beta doble, dos neutrones se desintegran simultáneamente para dar lugar a dos protones, dos rayos beta (electrones) y dos antineutrinos (la versión en antimateria de las huidizas partículas llamadas neutrinos). Los físicos se hallan hoy empeñados en la búsqueda de otro tipo de desintegración beta doble, en la que no se producen neutrinos ni antineutrinos. Si se descubriera semejante suceso, podría revelarnos uno de los mayores misterios de la naturaleza: ¿cuál es, si es que tiene, la masa del neutrino?

La teoría conocida por modelo estándar de las partículas elementales y las fuerzas básicas sugiere que esta partícula eléctricamente neutra no debería tener masa y sí acompañar siempre a cada electrón en la desintegración beta doble. Pero el modelo es, como mínimo, incompleto. Aunque explica con éxito las interacciones que surgen de dos de las cuatro fuerzas fundamentales (las fuerzas electromagnética y débil), no logra incorporar las dos restantes (la fuerza fuerte y la gravedad).

Varias teorías que van más allá del modelo estándar aventuran que el neutrino debería tener una masa definida. Los sucesos beta doble que acontecen sin la liberación de neutrinos o antineutrinos serían una consecuencia directa de la masa del neutrino. A pesar de que la masa que estas teorías asignan a dicha partícula es al menos 10.000 veces menor que la masa de un electrón, los neutrinos inundan el cosmos. Si poseen masa, podrían constituir el componente mayoritario de la misteriosa masa oscura que influye en la evolución de las galaxias y, tal vez, en la evolución global del universo mediante su atracción gravitatoria.

La radiactividad en general es consecuencia de la inestabilidad del núcleo atómico. Si del cambio de un neutrón a un protón en el núcleo resulta un átomo más ligero, la transformación se produce mediante una desintegración beta simple, que libera un electrón y un antineutrino. La diferencia de masa entre el átomo padre y su vástago es la energía de que disponen el electrón y el antineutrino expulsados, de acuerdo con el principio de Einstein de equivalencia entre masa y energía. Pero si el cambio de neutrón a protón diera lugar a un átomo dotado de mayor masa, entonces el principio de la conservación de la energía no permitiría la desintegración beta.

El nuevo protón creado por desintegración beta altera las propiedades químicas del átomo y lo convierte en el elemento siguiente de la tabla periódica. La carga negativa del electrón emitido compensa la carga positiva del nuevo protón, cumpliéndose con ello la ley de la conservación de la carga. (Por el proceso recíproco, bastante inusual, un protón se transforma en un neutrón, el átomo retrocede al elemento anterior de la tabla periódica y se emite un electrón positivo —un positrón— acompañado de un neutrino.)

El tipo observado de desintegración beta doble ofrece el mismo resultado que una secuencia de dos desintegraciones beta simple, pero no puede presentarse como dos desintegraciones separadas porque la primera desintegración beta está prohibida desde el punto de vista energético: crearía un núcleo hijo más pesado que el progenitor. Sólo el producto de la segunda desintegración es más liviano que el núcleo original. Las dos desintegraciones beta simple deben ocurrir simultáneamente y mediante un proceso de efecto túnel mecánico-cuántico a través de la barrera energética que representa la primera desintegración. Los productos de desintegración de la primera fase —virtual— no se materializan hasta que ha terminado la segunda fase. La desintegración beta doble libera siempre dos rayos beta: electrones o positrones rápidos. La historia de la física, sin embargo, no ha aclarado todavía si los neutrinos deben acompañar siempre a los rayos beta.

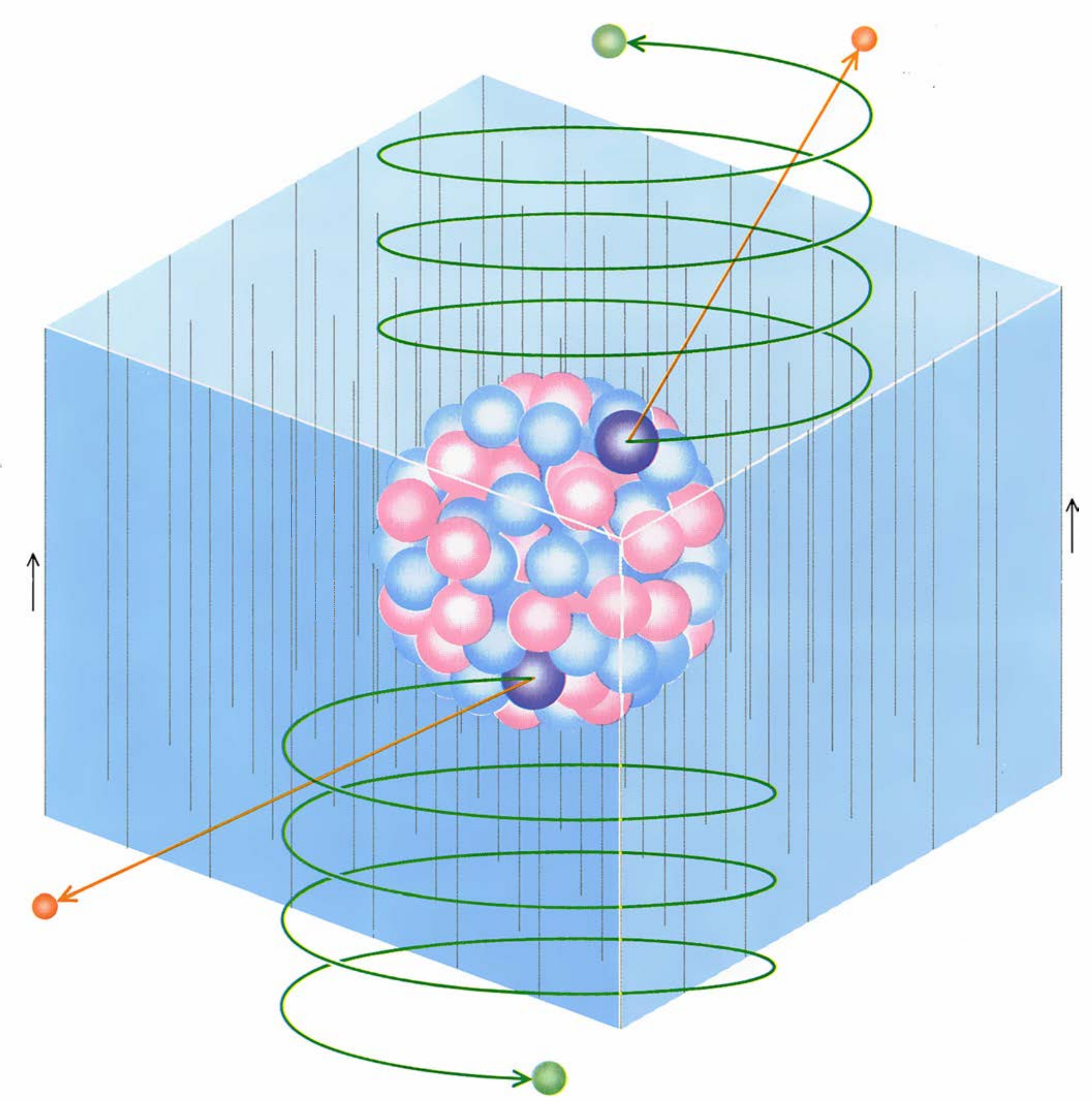
El primer indicio de la existencia de los neutrinos fue la observación de que faltaba energía en la desintegración beta sencilla. Si la diferencia de masas entre un átomo y su progenitor se hubiera convertido en energía del rayo beta, entonces las energías de los rayos beta que resultaran de la desin-

MICHAEL K. MOE y SIMON PETER ROSEN se han acercado a la desintegración beta doble desde direcciones opuestas. Moe es físico experimental que inició su formación en la Universidad de Stanford y se doctoró por el Instituto de Tecnología de Case. Hoy en la Universidad de California en Irvine, desde 1971 está empeñado en la búsqueda de sucesos beta doble. En 1987 Moe y dos colaboradores observaron el primer suceso de éstos. Rosen ha abordado la desintegración beta desde el lado teórico. Hizo su carrera académica en la Universidad de Oxford. En 1959 él y Henry Primakoff publicaron un trabajo que preparó el terreno para posteriores investigaciones sobre la desintegración beta doble. Desde su puesto actual en Los Alamos, su campo de interés se ha extendido a las fuerzas que se encuentran detrás de la desintegración beta doble, a saber, las interacciones débiles.

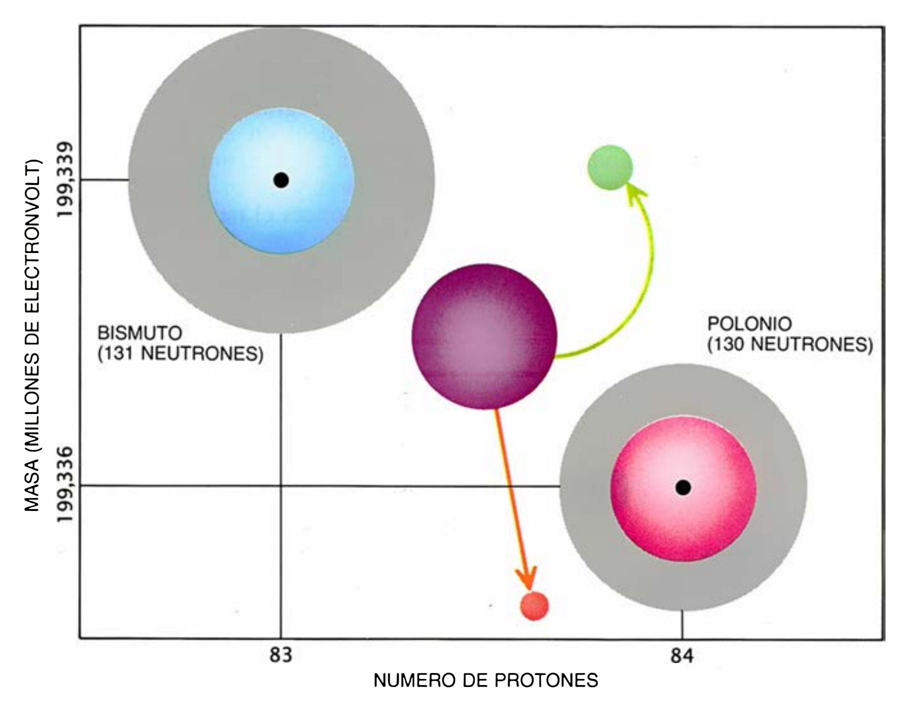
tegración de núcleos del mismo tipo deberían haber sido idénticas. Mas todos los electrones observados tenían energías distintas, siempre menores que la energía equivalente a la diferencia de masas. Ya en 1930 Wolfgang Pauli sospechó que la naturaleza no rompía la ley de conservación de la energía, sino que estaba ocultando una partícula desconocida. Apodada más tarde neutrino, esta partícula se llevaba parte de la energía en la desintegración beta. Pero no resultaba fácil la detección del neutrino porque sólo interaccionaba débilmente con la materia; tan débilmente, que no se observó hasta 1956, cuando Clyde L. Cowan, Jr. y Frederick Reines capturaron los que emanaban de un reactor nuclear.

Según el modelo estándar, el neutrino que acompaña a un rayo beta negativo es la antipartícula correspondiente a la que acompaña a un rayo beta positivo. Sin embargo, las teorías que trascienden dicho modelo y asignan una masa al neutrino predicen que la partícula emitida con un rayo beta negativo debe ser la misma que la emitida con uno positivo. En otras palabras, el neutrino sería su propia antipartícula. ¿Cómo saber si estas predicciones son correctas?

La desintegración beta doble es el proceso ideal en el que buscar una respuesta a la pregunta. Si el neutrino tiene masa y es su propia antipartícula, entonces el neutrino emitido en la primera fase del proceso podría quedar reabsorbido en la segunda, resultando una forma de desintegración en la que no se materializan neutrinos. En este caso es de esperar que, por lo menos en algunas desintegraciones doble beta, se emitan única-



1. SIGNATURA CARACTERISTICA de una desintegración beta doble, señal que emana del núcleo de un átomo de selenio que está formado por 48 neutrones (*azul y púrpura*) y 34 protones (*rojo*). Dos de los neutrones (*púrpura*) se desintegran simultáneamente dando lugar a dos protones y en el proceso generan dos rayos beta —electrones— (*verde*) y dos antineutrinos (*naranja*). Un campo magnético externo (*gris*) hace que las trayectorias de los electrones liberados describan espirales. La espiral doble es un signo observable del suceso beta doble. El átomo resultante es el kryptón.



2. DESINTEGRACION BETA SIMPLE, capaz de transformar el bismuto 214 en polonio 214. La transformación se produce cuando un neutrón se desintegra dando un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino. La pérdida de masa queda a disposición del electrón y el antineutrino.

mente dos electrones, sin el acompañamiento de neutrinos. Por contra, en el caso de que neutrino y antineutrino carecieran de masa y fueran objetos distintos, entonces el neutrino emitido en la primera fase de la desintegración beta doble nunca podría absorberse en la segunda fase, y los dos electrones siempre irían acompañados de dos neutrinos. Al neutrino que constituye su propia antipartícula se le conoce por neutrino de Majorana, en honor de Ettore Majorana, de quien nació la idea.

La desintegración beta doble en cualquiera de sus formas permaneció confinada, en un primer momento, en el reino de la teoría. La naturaleza dejó caer la primera pista en los años treinta. Algunos candidatos a la desintegración beta podrían encontrarse aún en la corteza terrestre, miles de millones de años después de su extinción por desintegración radiactiva. Werner Heisenberg señaló que estos núcleos, verosímilmente estables, eran "par-par": estaban constituidos por un número par de protones y un número par de neutrones. La fuerza nuclear fuerte tiende a juntar los pares de partículas iguales con mayor intensidad que a los pares de partículas diferentes. Cada nucleón (protones y neutrones) de un núcleo par-par se puede aparear con otro nucleón del mismo tipo; por tanto, esos núcleos son más estables que los núcleos vecinos "impar-impar", que contienen el mismo número total de nucleones pero poseen números impares de neutrones y protones. Por dar un ejemplo: los 34 protones y los 48 neutrones del selenio 82 se hallan más estrechamente ligados que los 35 protones y los 47 neutrones del bromo 82. (Los elementos se distinguen por sus propiedades químicas, relacionadas con el número de protones. Los isótopos de un elemento tienen el mismo número de protones y un número variable de neutrones; se identifican por el número total de protones y neutrones de un átomo.)

A la masa de un núcleo hay que sustraer la masa equivalente a su energía de enlace: la energía necesaria para separar sus componentes. Por consiguiente, un núcleo fuertemente ligado es más ligero que otro más débilmente ligado que contenga el mismo número de nucleones. Así, el selenio, siendo el elemento menos pesado, no deberá desintegrarse para dar bromo, a pesar de que este segundo elemento posea un neutrón menos y un protón más.

El argumento de la estabilidad no proporcionaba, sin embargo, una solución cabal. Puede suceder, y sucede de hecho, que un núcleo par-par sea más ligero que su vecino impar-impar inmediato (un protón demás, un neutrón de menos) y más pesado que el vecino par-par que le sigue (dos protones de más, dos neutrones de menos). Aunque el selenio 82 sea más ligero que el bromo 82, es más pesado que el kryptón 82. Por tanto, aunque la desintegración beta del selenio al bromo está energéticamente prohibida, la desintegración beta doble del selenio al kryptón debe producirse.

En 1935, Maria G. Mayer, a sugerencia de su colega Eugene P. Wigner, calculó el período de semidesintegración ("half-life") de la desintegración beta doble: el tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los átomos de un isótopo. Según el esquema de Mayer, dos neutrones se desintegraban simultáneamente en dos protones, dos electrones y dos antineutrinos. Con la adición de los dos protones, el átomo avanza dos puestos en la tabla periódica (cambia el número atómico en dos). El resultado de Mayer fue un período de semidesintegración que se prolongaba más de 10^{17} años, una lentitud exasperante incluso en la escala geológica. Así, la rara ocurrencia de la desintegración beta doble daría cumplida respuesta al problema original de por qué todavía se encuentran algunos isótopos inestables.

No bastaba el cálculo por sí solo para establecer la realidad de la desintegración beta doble. Los colegas de Mayer empezaron a estudiar posibles vías de confirmación de la existencia de la desintegración beta doble. El ritmo predicho de la desintegración beta doble, lentísimo, desalentaba cualquier empeño por observarla directamente en el laboratorio. Pero esos mismos físicos experimentales reconocieron que podía existir alguna esperanza de encontrar pruebas indirectas de la desintegración beta doble si se encaminaban hacia acumulaciones sospechosas de los productos resultantes en minerales geológicamente viejos y ricos en los productos progenitores. Lo normal era que la producción infinitesimal de átomos hijos quedara oculta entre la horda ingente de átomos idénticos, presentes en los minerales desde el momento de su formación. Ahora bien, los átomos de los gases nobles quedan ampliamente excluidos de los minerales en el proceso de cristalización, a causa de su volatilidad y de su inactividad química; cualquier átomo de esos que se produjera en el interior de la muestra se añadiría a la baja concentración natural del gas. Por fortuna para nosotros, entre los isótopos que son candidatos a la desintegración beta doble se cuentan algunos cuyos hijos son gases nobles.

La desintegración beta doble del selenio 82 daría un gas noble, el kryptón; la desintegración del teluro 128 y del teluro 130, otros dos candidatos a la desintegración beta doble, produciría otro gas noble, el xenón. Los minerales que contienen selenio o teluro

deberían, por tanto, ir acumulando kryptón o xenón con el paso del tiempo. Ciertamente, la cantidad de gas producido durante mil millones de años de vida de un mineral sería pequeña; no llegaría a una parte en cien millones, si las estimaciones de Mayer eran esencialmente correctas.

En 1949 Michael G. Inghram y John H. Reynolds, de Chicago, ingeniaron una técnica para examinar los gases fósiles atrapados en yacimientos antiguos de selenio y teluro. Liberaron los gases en un espectrómetro de masas, al objeto de determinar su composición. En 1968, después de algunos refinamientos de este método geoquímico, Till Kirsten, Oliver A. Schaeffer, Elinor F. Norton y Raymond W. Stoenner encontraron un concluyente exceso de xenón 130 en un yacimiento de teluro de 1300 millones de años. Este resultado constituía la primera prueba indiscutible de la realidad de la desintegración beta doble.

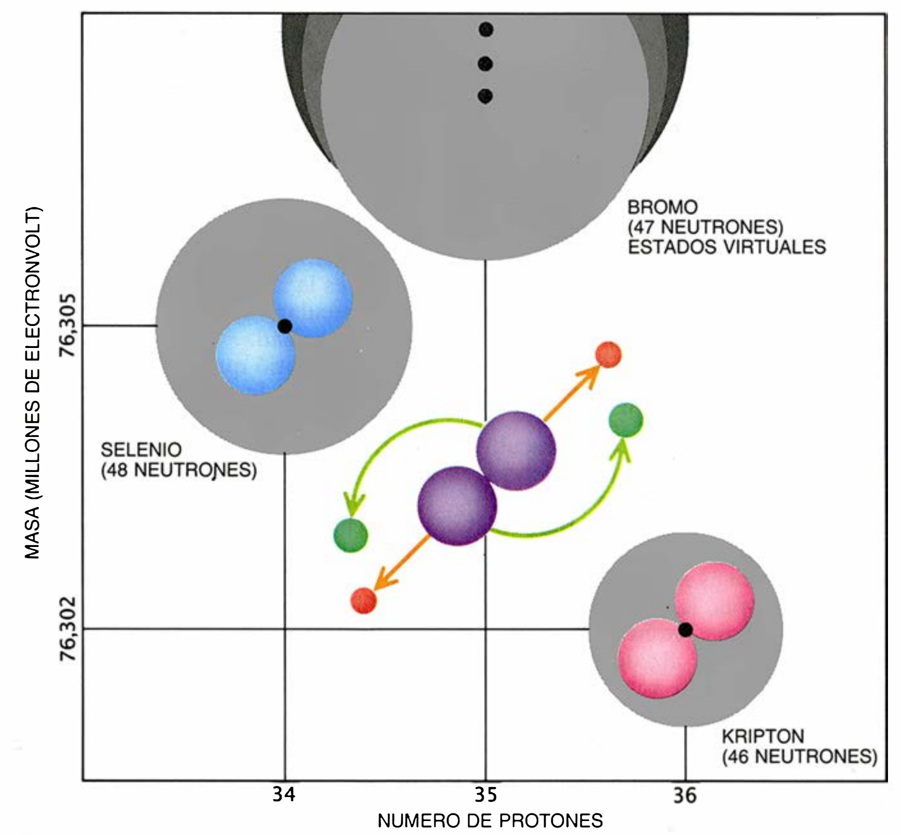
A partir de la edad del yacimiento y de la fracción de teluro que se había desintegrado en xenón, se determinó el período de semidesintegración de la desintegración beta doble del teluro 130. Estos experimentos geoquímicos plantearon dos problemas importantes. Por un lado, podían haberse producido pequeñas cantidades de xenón mediante procesos distintos de la desintegración beta doble. Por otro, podían haberse perdido pequeñas cantidades de gas del yacimiento a través de un lento proceso de difusión o de repentinos procesos catastróficos que hubieran calentado el yacimiento. Los geoquímicos, asistidos de razón, negaron valor a esas objeciones, pero las dudas persistían.

En 1939, cuatro años después de que Mayer publicara los cálculos teóricos de los períodos de semidesintegración, Wendell H. Furry, de Harvard, sugirió la posibilidad de que la desintegración beta doble aconteciera sin la emisión de neutrinos. Aunque la conservación de la energía y el momento exigía la emisión de un neutrino en la desintegración beta simple, semejante obligación no regía para el caso de la desintegración beta doble. La energía y el momento se podrían conservar en una desintegración que sólo liberara dos electrones. Furry se dio cuenta de que, si los neutrinos eran partículas de Majorana −idénticas a sus antipartículas−, la desintegración beta doble sin neutrinos podía competir con la desintegración beta doble de Mayer con dos neutrinos. Furry estimó que la desintegración beta doble sin neutrinos debía ocurrir con una frecuencia un millón de veces mayor que la del modo con dos neutrinos. Sin embargo, el período de semidesintegración era aún del orden de 10^{11} años; la desintegración beta doble sería todavía lo suficientemente rara como para explicar la aparente estabilidad de los núcleos par-par.

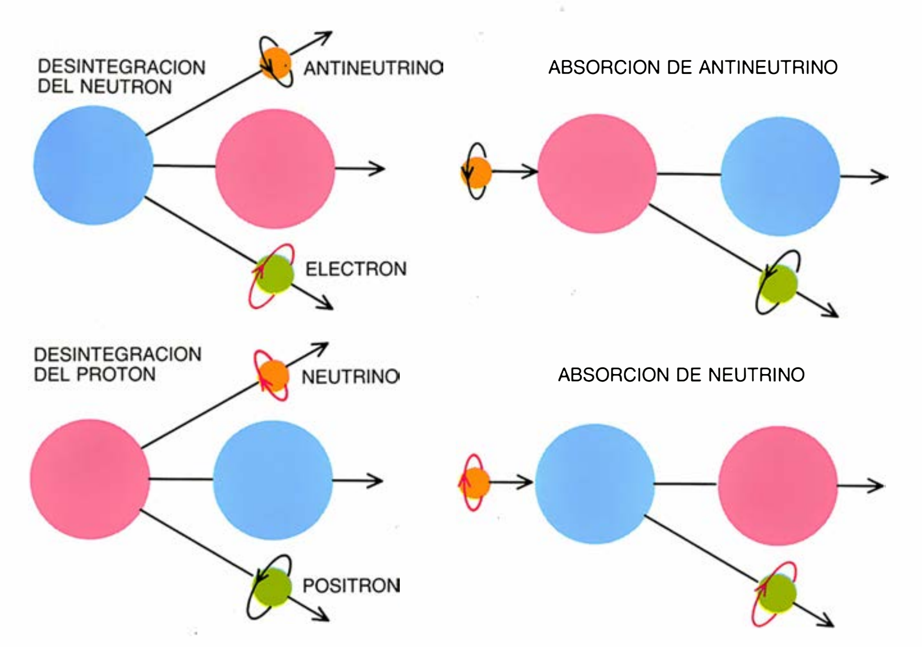
Parecía que la gran diferencia entre las vidas medias predichas para cada modo de desintegración permitiría determinar si, en efecto, se estaba produciendo una desintegración sin neutrinos. Edward L. Fireman, de Princeton, aceptó el desafío en 1948. Obtuvo dos muestras de estaño, una enriquecida artificialmente con estaño 124, candidato a la desintegración beta doble, y otra carente de este isótopo. Situó cada una de las muestras entre un par de tubos de Geiger-Müller (contadores Geiger), de manera que cada tubo podría recibir uno de los dos electrones procedentes de la desintegración beta doble; en consecuencia, los tubos se dispararían simultáneamente si ocurriera una desintegración beta doble. Encontró que el disparo simultáneo de los tubos se producía con notable mayor frecuencia en la muestra enriquecida que en la otra. A partir de los resultados calculó un período de semidesintegración más cercano al valor de Furry que al de Mayer. Y concluyó que había observado el modo de desintegración sin neutrinos.

Pero la excitación que siguió a este resultado duró poco tiempo. Experimentos realizados escasos años después, incluido uno del propio Fireman, no lograron confirmar que el resultado estuviera causado por una desintegración beta doble. Fireman acabó por admitir que sus resultados originales estaban probablemente distorsionados por una débil traza de una impureza radiactiva en la muestra enriquecida de estaño 124.

Hasta hace muy poco, todos los esfuerzos por detectar directamente una desintegración beta doble tropezaron con el mismo problema con el que Fireman se había encontrado. Trazas de elementos radiactivos en cantidades mínimas, de una parte en mil millones, enmascaraban con facilidad sucesos significativos en fuentes de desintegración beta doble; debíase ello a que el período de semidesintegración de esta desintegración −incluso en las estimaciones más opti-



3. DESINTEGRACION BETA DOBLE del selenio 82 en kryptón 82; se produce a través del bromo 82. Como en todas las desintegraciones beta dobles, el isótopo progenitor es más pesado que el producto final, pero ambos son más ligeros (menos energéticos) que el estado intermedio. La desintegración beta simple del selenio en bromo está energéticamente prohibida; la desintegración beta doble en kryptón, a través de un estado intermedio "virtual" que es el bromo, sí está permitida gracias al principio de incertidumbre. El estado final del kryptón aparece después de que dos neutrones hayan pasado a dos protones, con la emisión de dos electrones y normalmente dos antineutrinos.



4. EMISION Y ABSORCION de los neutrinos; se trata de fenómenos que ocurren sólo de ciertas maneras, según los experimentos y la teoría del modelo estándar. Cuando un neutrón (*arriba*) del interior del núcleo se transforma en un protón, emite un electrón y un antineutrino orientado a derechas. (Una partícula orientada a derechas gira en el sentido de las agujas del reloj, vista desde atrás.) Cuando un protón (*abajo*) se transforma en un neutrón, emite un positrón y un neutrino orientado a izquierdas. Un protón sólo puede absorber un antineutrino orientado a derechas (transformándose entonces en un neutrón). Un neutrón sólo puede absorber un neutrino orientado a izquierdas.

mistas– era como mínimo mil millones de veces más prolongado que el correspondiente a las desintegraciones radiactivas habituales.

Los obstáculos que la naturaleza ponía en el camino de los físicos experimentales serían pronto eclipsados por un problema más serio. En 1957, Chien-Shiung Wu y sus colaboradores realizaron un experimento basado en el trabajo teórico de Chen Ning Yang y Tsung-Dao Lee que puso en entredicho la existencia de la desintegración sin neutrinos. Este y otros experimentos no tardaron en revelar que todos los antineutrinos emergen de una desintegración beta simple con la misma "orientación".

Las implicaciones de este descubrimiento en la física y en la desintegración beta doble surgieron de las propiedades básicas de ciertas partículas fundamentales. Los neutrinos, electrones, protones y neutrones poseen todos un espín intrínseco. Podemos imaginárnoslos como minúsculas peonzas en giro alrededor de unos ejes internos, a la vez que viajan a través del espacio y dentro de los átomos. La peonza tiene dos orientaciones posibles; cuando se aleja de un observador, gira en el sentido de las agujas del reloj o en sentido antihorario. Dicho de manera más precisa, cuando gira en sentido de las agujas del reloj, u orientada a derechas, el vector que describe el espín está alineado en la misma dirección que el vector que describe el movimiento, o momento. En la orientación a izquierdas, el vector de espín apunta en la dirección opuesta a la del vector momento. Por tanto, partículas como los electrones y los neutrinos pueden orientarse a derechas o a izquierdas.

En algunas interacciones, la probabilidad de generarse una partícula orientada a derechas o a izquierdas es la misma: que gire en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario. Cuando la probabilidad de un resultado es la misma que la de su imagen especular, decimos que se conserva la paridad.

Wu descubrió que la paridad no se conservaba en la desintegración beta simple. Su trabajo condujo a otras demostraciones de que el antineutrino que acompaña a un rayo beta negativo (un electrón) siempre se orienta a derechas. Además, el neutrino que acompaña a un rayo beta positivo (un positrón) se orienta siempre a izquierdas. Si la paridad se conservara en una desintegración beta, sería igualmente probable una configuración orientada a derechas que una orientada a izquierdas para cada tipo de desintegración.

El descubrimiento de la no conservación de la paridad en la desintegración beta implicaba que la desintegración beta doble sin neutrinos sería un proceso muy poco probable. Los teóricos llegaron a esta conclusión considerando modelos de desintegración beta doble en el modo sin neutrinos. La desintegración sin neutrinos libera sólo dos electrones. (Cabe también la liberación de dos positrones, aunque se espera que sea mucho menos corriente.) En la primera mitad del proceso sin neutrinos, un neutrón libera un electrón y un antineutrino orientado a derechas, que entonces debe ser absorbido dentro del núcleo. Todo parece indicar que un antineutrino orientado a derechas sólo puede ser absorbido por un protón. Cuando esto sucede, el protón expulsa un positrón, convirtiéndose así en un neutrón. Este proceso no conduciría a una desintegración beta doble, puesto que el átomo resultante posee el mismo núcleo que el original y, por tanto, la misma masa. Pero si el antineutrino orientado a derechas pudiera convertirse en neutrino orientado a izquierdas, un neutrón podría absorberlo. El neutrón se desintegraría en un protón, expulsando un segundo electrón sin la compañía de un neutrino. Un observador vería dos neutrones desintegrándose en dos protones, expulsando en el proceso dos electrones y ningún neutrino.

La teoría de Furry proporcionó un mecanismo para la conversión de antineutrino en neutrino, pues concedía que los neutrinos eran partículas de Majorana. La distinción que suele hacerse entre neutrino y antineutrino podría ser artificial al apoyarse sólo en la distinta orientación con la que emergen de los diversos procesos. Pero al considerar la orientación adecuada, el modo sin neutrinos resutaba estar prohibido, ¡con independencia de que el neutrino fuera o no una partícula de Majorana! Llegados a este punto, se abandonaron la mayoría de experimentos sobre desintegración beta doble.

Con el avance teórico de finales de la década de los setenta empezó a tomar cuerpo la idea de que los neutrinos tenían masa. Los neutrinos con masa eliminarían el escollo de la orientación que había prohibido, por razones teóricas, la desintegración beta doble sin neutrinos. El ritmo de desintegración permitido por la masa del neutrino sería más lento que la predicción original de Furry, pero la desintegración podía acontecer en un nivel muy bajo, determinado por la magnitud de la masa de neutrinos. Así, la búsqueda de desintegración beta doble sin neutrinos se convirtió en banco de pruebas para determinar los neutrinos de Majorana y la masa del neutrino; y resurgió una intensa actividad experimental y teórica.

La relación entre la masa del neutrino y su orientación surge de la teoría de la relatividad especial, según la

cual una partícula sin masa viaja siempre a la velocidad de la luz; es decir, no se puede encontrar ningún sistema de referencia en que la partícula se halle en reposo. Luego, es imposible detener una partícula carente de masa para invertir el sentido de su movimiento, de manera que cambie su orientación. Por contra, la partícula con masa no nula nunca viaja a la velocidad de la luz. Y a ella sí la podemos llevar al estado de reposo para luego invertir el sentido de su movimiento sin cambiar la dirección de su espín. En consecuencia, la transformación derecha-izquierda necesaria para la desintegración beta doble sin neutrinos podría tener lugar si los neutrinos poseyeran masa.

La necesidad de la transformación derecha-izquierda podría obviarse si ninguno de los casos de desintegración beta siguiera las reglas de orientación que parecen aplicarse a la emisión y absorción de neutrinos. Los experimentos indican los vectores espín y momento sólo con cierto grado de exactitud. Cabe, pues, que la desintegración de un neutrón pudiera, en contadas ocasiones, producir un neutrino de Majorana orientado a izquierdas, y que otras veces un neutrón absorbería un neutrino de Majorana orientado a derechas. Ahora bien, estas violaciones de las reglas de la emisión y absorción de neutrinos exigirían que el neutrino tuviera masa. Parece, pues, que, para que se produzca la desintegración beta doble sin neutrinos, resulta preciso que el neutrino tenga masa; y viceversa: la observación del fenómeno implica que el neutrino posea masa.

Los físicos experimentales no han conseguido detectar el modo sin neutrinos pero el progreso en el formidable problema que representa distinguir la desintegración beta doble de los sucesos espúreos ha llevado a la detección directa del modo con dos neutrinos. En 1987, Steve R. Elliott, Alan A. Hahn y uno de nosotros (Moe), de Irvine, dieron cuenta de estos primeros resultados, obtenidos en una muestra de selenio 82. Se eligió este elemento porque su energía de desintegración era mayor que casi todos los demás y los resultados geoquímicos indicaban un período de semidesintegración bastante corto. Debido a que las fuentes naturales de selenio sólo contienen el 9 por ciento del isótopo 82, se preparó una muestra enriquecida al 97 por ciento de selenio 82, con el fin de disponer de más fuentes de desintegración beta doble y reducir el riesgo de contaminación.

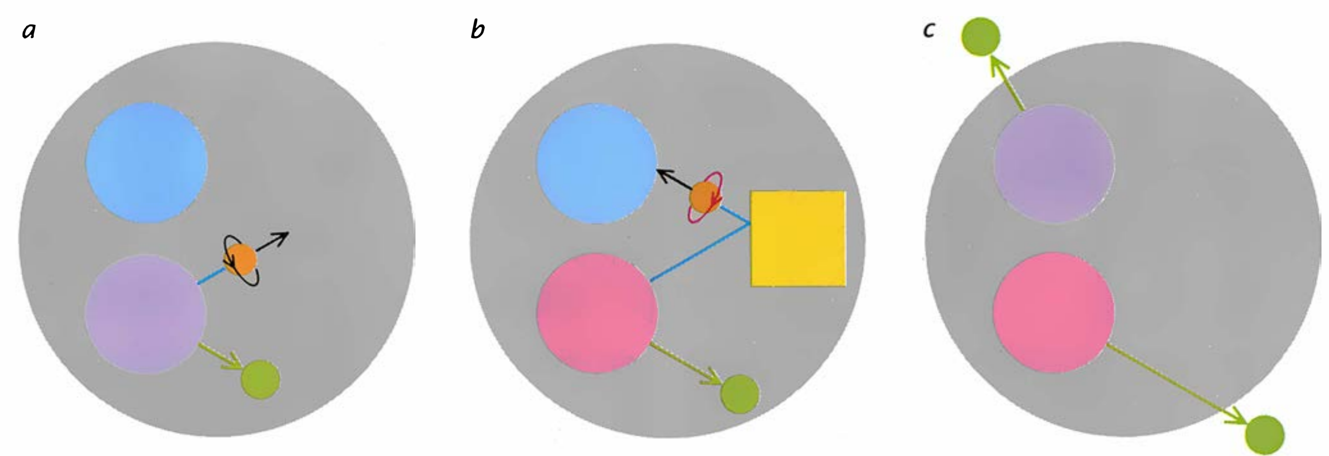
La muestra se colocó en la cámara de proyección de tiempo. Ese dispositivo, lleno de gas, se sometió a un intenso campo magnético. Las partículas beta que atravesaban la cámara ionizaban el gas, dejando trazas que los sensores registraban. El campo magnético obligaba a cada electrón a curvarse de manera que revelara su dirección de movimiento. Cualquier suceso beta doble dejaría una señal característica en la cámara: dos electrones describiendo una espiral que se alejaba de la muestra de selenio.

Esta firma inimitable de la desintegración beta doble ayudó decisivamente a eliminar señales espúreas. Los electrones solitarios liberados por el selenio no pueden pasar por un suceso beta doble, ya que sólo producen una espiral. Un electrón y un positrón —par generado cuando los rayos gamma inciden sobre la muestra— crean una doble espiral, pero el positrón se curva al revés. Dos electrones expulsados a la vez por sucesos espacialmente separados en la fuente se identifican también sin dificultad. A fin de engañar a los sensores, los dos electrones debían originarse en el mismo punto de la muestra.

Pues bien, los electrones que resultan de un proceso capcioso se comportan así. En la desintegración beta sencilla el núcleo del átomo producido queda a menudo en un estado excitado. La energía adicional suele emitirse en forma de rayos gamma, pero a veces se transfiere a uno de los electrones que orbitan en torno al átomo, sobre todo si hablamos de átomos pesados, como los de los productos de desintegración del uranio y el torio. Se expulsan así dos electrones de un mismo átomo: la partícula beta y el electrón orbital arrojado. El par imita, casi a la perfección, la desintegración doble beta.

Afortunadamente, la mayoría de los productos del uranio y el torio continúan desintegrándose en otros elementos. Transcurrido cierto tiempo, emiten otras partículas, delatando al impostor que simulaba la desintegración beta doble. En el caso del bismuto 214, un contaminante que genera excelentes imitaciones doble beta, el observador no tiene que esperar mucho. En un milisegundo, el átomo que resulta del bismuto 214 emite una partícula alfa, compuesta de dos protones y dos neutrones, que señala el falso suceso. Las partículas alfa, que forman trazas rectas y densas en el gas de la cámara de proyección de tiempo, muestran poco poder de penetración: un simple trozo de papel las detiene. Se procuró, pues, que la muestra de selenio para la cámara fuera delgada, a fin de que las partículas alfa pudieran escapar y denunciar los sucesos falsos. Desgraciadamente, esta exigencia limitó la masa de la muestra y, por tanto, la precisión del experimento.

Todo el aparato se encerró entre



5. DESINTEGRACION BETA DOBLE sin neutrinos: es posible, en teoría, si estas partículas tienen masa. Un neutrón del interior del núcleo (*a*) emitiría un antineutrino orientado a derechas y un electrón. A través de algunos procesos extraños (*caja amarilla*), el antineutrino se transformaría en un neutrino orientado a izquierdas (*b*), para que entonces lo absorbiera un neutrón. La absorción (*c*) provocaría la emisión de un electrón. Un observador vería dos neutrones transformándose en dos protones y emitiendo dos electrones pero ningún neutrino. (Diagramas de Gabor Kiss.)

gruesas paredes de plomo, que apantallaban la cámara de los rayos gamma que emanan de manera natural del cemento de las paredes del laboratorio. El plomo no protegía la cámara de los rayos cósmicos y, así, cada segundo, penetraban en la cámara unos 40 sucesos de rayos cósmicos. Se instaló un detector de rayos cósmicos que impidiera el registro de tales sucesos. Incluso dejando de lado gran parte de los rayos cósmicos, la cámara registraba una traza aproximadamente cada tres segundos.

En este mar de sucesos espúreos, una de cada 90.000 trazas indicaba la señal de una desintegración beta doble (una traza cada tres días). Para facilitar la elección de las señales deseadas se programó un ordenador que analizara los datos. Los investigadores verificaban las elecciones del ordenador y calculaban las energías de los distintos electrones.

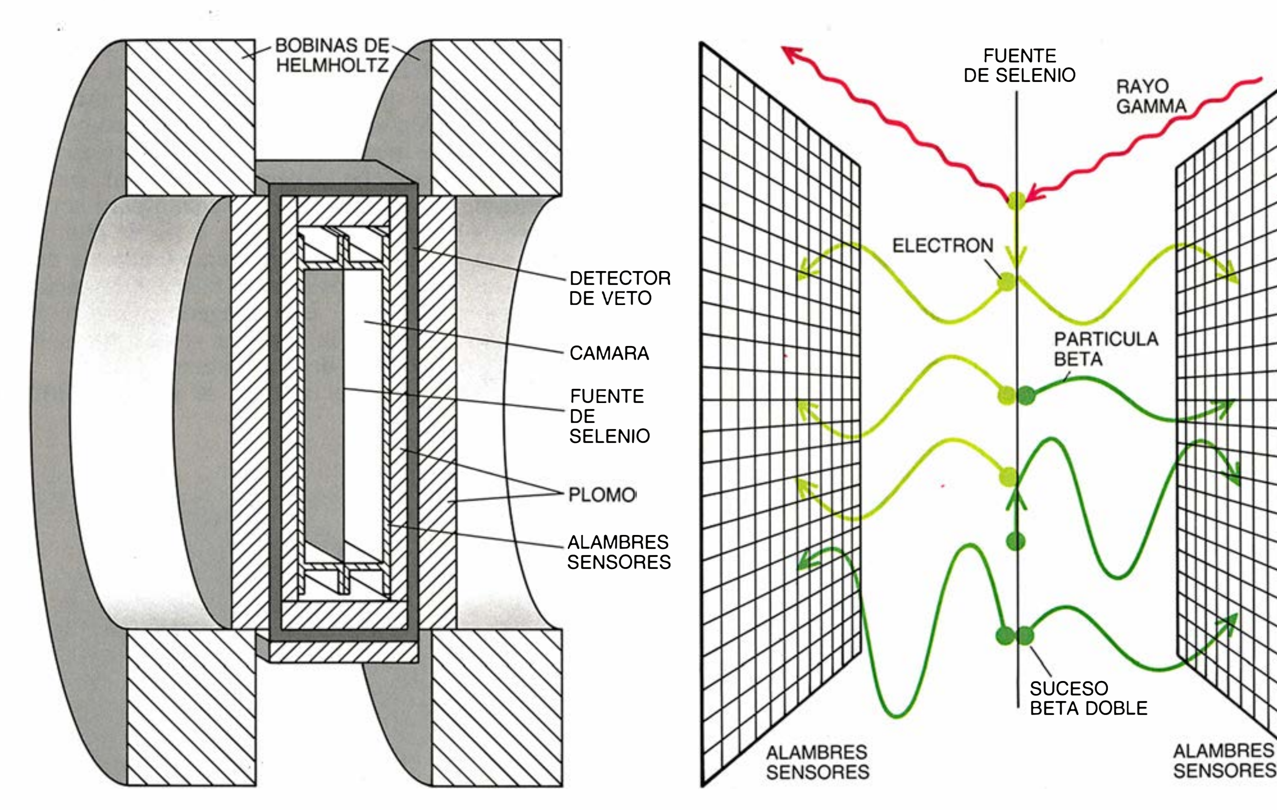
A fin de determinar el período de semidesintegración de la desintegración beta doble y descubrir cuál de los modos se había detectado, el grupo recogió datos durante un año. Para entonces se habían acumulado suficientes candidatos a la desintegración beta doble que permitían dar una idea del espectro de energía. (Una gráfica representa el número de sucesos beta doble en función de la energía total de los dos electrones.) Para el modo de dos neutrinos se esperaba que el espectro de energía fuera una curva ancha, ya que, en cada desintegración, la energía se distribuiría de manera diferente entre los electrones y los neutrinos. Para el modo sin neutrinos, los electrones se llevarían toda la energía de la desintegración; por tanto, era de esperar que el espectro de energía mostrara un pico claro.

El espectro de energía reveló sólo el modo con dos neutrinos; no mostró el pico de los sucesos sin neutrinos. El ritmo de los sucesos indicaba que el período de semidesintegración del selenio 82 era $1{,}1 \times 10^{20}$ años; es decir, mil millones de átomos podrían sobrevivir mil millones de años con la probabilidad de sólo un 1 por ciento de que un solo núcleo sucumbiera en una desintegración beta doble.

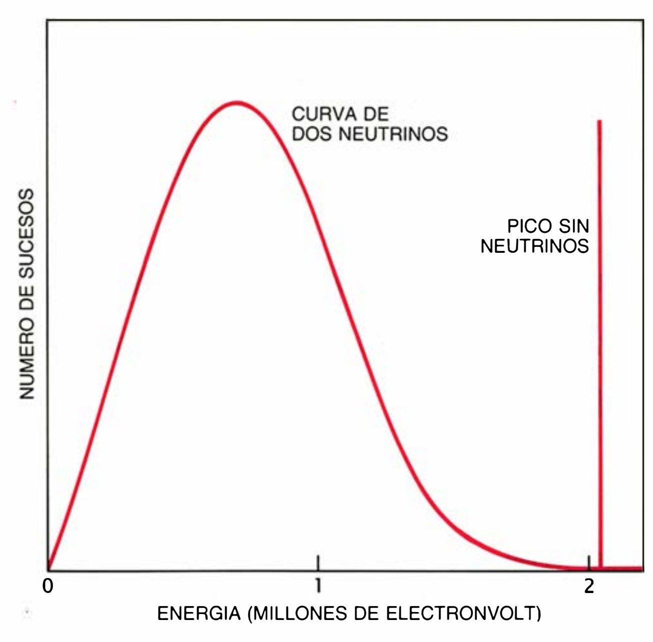
La cámara de proyección de tiempo se trasladó hace poco a un túnel subterráneo del pantano de Hoover, con el fin de evitar el ruido de fondo inducido por los rayos cósmicos que escapaban al detector que los desechaba. El dispositivo registra sucesos beta dobles en su búsqueda de desintegraciones sin neutrinos. Aunque dicho modo no se ha detectado, la medición del período de semidesintegración del modo con dos neutrinos ha servido para acotar mejor la masa del neutrino merced a la aportación de uno de los factores que se necesitan en el cálculo de la masa a partir del modo sin neutrinos.

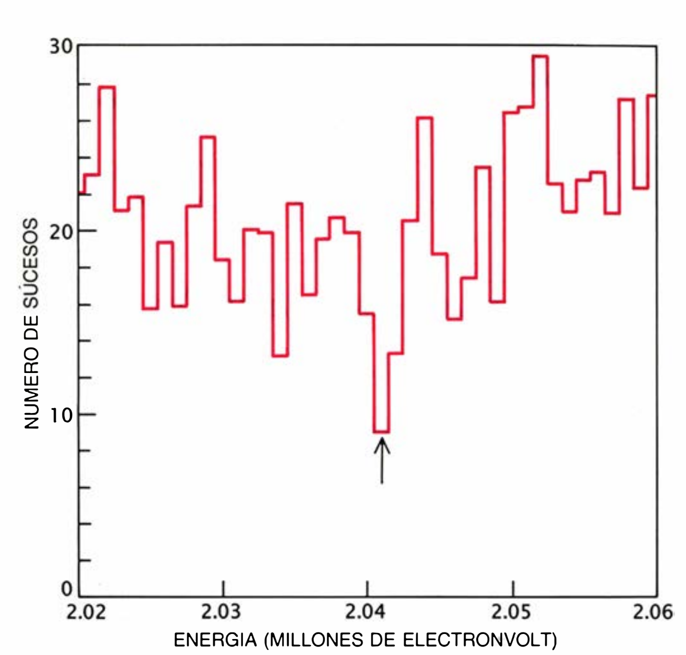
El ritmo de la desintegración sin neutrinos guarda relación con tres factores. En primer lugar, con la masa del neutrino. Luego, con la diferencia de energías entre el elemento progenitor y el que produce, que se conoce como energía de transición. El tercer factor es el elemento de matriz, cantidad teórica que da cuenta de las interacciones entre las partículas del núcleo y de los estados virtuales intermedios. Así, una medición del ritmo de la desintegración sin neutrinos se podría utilizar para encontrar la masa del neutrino, siempre que el elemento de matriz pudiera calcularse a partir de principios físicos fundamentales. Pero los cálculos de los elementos de matriz son altamente complicados y, en consecuencia, sus valores resultan algo inciertos.

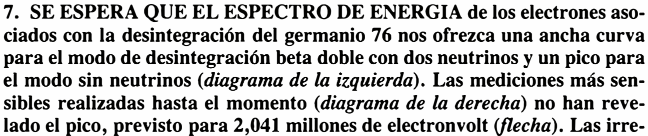
En el caso de la desintegración con



6. LA CAMARA DE PROYECCION DE TIEMPO (*izquierda*) suministró la primera prueba directa de la desintegración beta doble registrando los electrones emitidos. Se coloca una muestra de selenio 82 en el plano central del detector. Alrededor de la muestra hay una cámara llena de helio. Una caja de plomo protege la cámara de la radiactividad exterior; un detector de "veto" rechaza los sucesos que originan los rayos cósmicos incidentes. Una bobina de Helmholtz genera un campo magnético, que hace que los rayos beta que se producen en la cámara sigan trayectorias helicoidales. Conforme las partículas beta se mueven a través del helio, lo ionizan. Un campo eléctrico aplicado provoca entonces que los electrones salientes se dirijan hacia alambres sensores, que registran su tiempo y posición de llegada. La traza de los electrones libres se analiza a fin de reconstruir las trayectorias helicoidales seguidas por los rayos beta. El tamaño e inclinación de una hélice nos proporciona la energía del rayo beta. La señal de una desintegración beta doble (*suceso inferior, en la ilustración de la derecha*) puede ser imitada por los raros sucesos de fondo mostrados encima de la señal. Tales impostores suelen quedar en evidencia al cabo de unas horas, cuando el núcleo que ha resultado del suceso se desintegra allí.







7. SE ESPERA QUE EL ESPECTRO DE ENERGIA de los electrones asociados con la desintegración del germanio 76 nos ofrezca una ancha curva para el modo de desintegración beta doble con dos neutrinos y un pico para el modo sin neutrinos (*diagrama de la izquierda*). Las mediciones más sensibles realizadas hasta el momento (*diagrama de la derecha*) no han revelado el pico, previsto para 2,041 millones de electronvolt (*flecha*). Las irregularidades del espectro son principalmente el resultado de fluctuaciones estadísticas en el ruido de fondo. Si se supone que la contribución beta doble sin neutrinos es menor que el tamaño de las fluctuaciones estadísticas, el período de semidesintegración del germanio 76 para el modo sin neutrinos debe ser mayor que 2,3 × 10^{24} años. David O. Caldwell y sus colaboradores, de Santa Barbara y de Berkeley, han recogido los datos.

dos neutrinos, sin embargo, el ritmo de desintegración depende sólo del elemento de matriz y de la conocida energía de transición. La medición del ritmo de desintegración con dos neutrinos (o equivalentemente de su período de semidesintegración) constituye, pues, una comprobación directa de modelos del elemento de matriz; y suministra una base firme a uno de los factores que se necesitan para calcular la masa del neutrino a partir de estimaciones de la semivida o período de semidesintegración del modo sin neutrinos.

Con la esperanza de determinar la masa del neutrino, unos 20 laboratorios de todo el mundo están buscando el modo sin neutrinos. El detector más sensible para medir la desintegración sin neutrinos desarrollado hasta ahora es el calorímetro, que sólo mide una cosa: la energía total de los dos electrones. La técnica —concebida por los físicos Maurice Goldhaber y Edward der Mateosian— es efectiva cuando el isótopo emisor beta doble y el detector son exactamente los mismos. Ettore Fiorini adaptó la técnica a un calorímetro de cristal de germanio, que es un detector que contiene un 8 % de germanio 76, un isótopo progenitor de la desintegración beta doble.

El calorímetro resulta, de suyo, el más engañoso de todos los detectores beta doble, incapaz como es de distinguir entre una desintegración beta doble y cualquier otro proceso que libere la energía apropiada. Sin embargo, los detectores de germanio han demostrado ser herramientas muy poderosas en la larga búsqueda del modo sin neutrinos. Podemos hacer crecer monocristales de germanio muy puros y sin apenas contaminación radiactiva. Una desintegración beta doble producida dentro del cristal se detectaría con una seguridad próxima al cien por cien. La energía liberada puede medirse con una precisión tan alta que la búsqueda de la desintegración sin neutrinos puede limitarse a una estrecha "ventana" de energías centrada en la angosta línea espectral esperada para el modo sin neutrinos.

Podemos disponer varios cristales uno tras otro, y someter bajo control un notable número total de átomos de germanio 76. Mediante un detector de rayos gamma que ciña al germanio, identificaremos —y desecharemos— la actividad de los rayos gamma en los cristales. David O. Caldwell y sus colaboradores han construido el dispositivo más sensible del mundo, un conjunto de ocho cristales de germanio. El grupo aún no ha observado el pico de energía que correspondería al modo sin neutrinos. Concluyen con ello que el período de semidesintegración de la desintegración beta doble sin neutrinos en el germanio 76 se prolonga, como mínimo, 2,3 × 10^{24} años. (Sólo ocurrirían tres o cuatro sucesos por año y kilogramo de germanio.) Esta cota para la semivida corresponde a un límite superior para la masa del neutrino de entre 0,6 y 3 electronvolt.

Nuevos experimentos que utilizan cristales en los que el germanio 76 se ha enriquecido hasta 10 veces más que en su estado natural pueden llegar a ser entre tres y diez veces más sensibles a la masa del neutrino que los detectores actuales. Grandes calorímetros y detectores que utilizan molibdeno 100, xenón 136 y otros isótopos de alta energía de transición pueden incluso superar esos valores de sensibilidad. El pico del modo sin neutrinos que encontramos al final del espectro curvo de los dos neutrinos se ha comparado con el cubo lleno de oro que hay donde acaba un arco iris. Con éste a la vista, la naturaleza nos llama aún más irresistiblemente hacia el horizonte, donde se esconde quizás el modo de desintegración beta doble sin neutrinos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIRECT EVIDENCE FOR TWO-NEUTRINO DOUBLE-BETA DECAY IN ^{82}SE. S. R. Elliott, A. A. Hahn y M. K. Moe en *Physical Review Letters*, vol. 59, n.º 18, págs. 2020-2023; noviembre 1987.

A REVIEW OF RECENT DEVELOPMENTS IN DOUBLE-BETA DECAY. F. T. Avignone III y R. L. Brodzinski en *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 21, dirigido por Amand Faessler. Pergamon Press, 1988.

Así reconocen las células *T* a los antígenos

Estos actores principales de la respuesta inmunitaria son ciegos. Corresponde a otros fragmentar el material foráneo y envolverlo en proteínas del organismo, antes de exponerlo a las células T

H. M. Grey, A. Sette y S. Buus

El cuerpo humano libra un combate constante e imperceptible contra microbios invasores y células malignas. La batalla es dirigida por el sistema inmunitario, capaz de eliminar o neutralizar virtualmente cualquier invasor sin afectar a los tejidos del propio cuerpo. Los principales defensores son los linfocitos, glóbulos blancos de la sangre, con al menos dos puntas de ataque. La más conocida son las células *B*, que reaccionan contra el antígeno –material foráneo– segregando anticuerpos que se unen al invasor. Reforzando la actividad de las células *B*, y potenciándola con una segunda respuesta defensiva, están las células *T*. Estos linfocitos coadyuvan a que las células *B* proliferen y excreten anticuerpos; matan también directamente células malignas e infectadas con virus.

La respuesta inmunitaria se desencadena así: una molécula receptora de la superficie de una célula *B* o *T* encuentra al antígeno contra el que la célula está programada para responder y lo reconoce como foráneo, al unirse a alguna pequeña parte del mismo. Con la ayuda de otros elementos del sistema inmunitario, la célula se multiplica y ejerce su función de célula *B* secretora de anticuerpos, de célula *T* citotóxica (célula asesina) o de célula *T* coadyuvante, que segrega sustancias que movilizan a las otras células. Las células *B* son capaces, por sí solas, de llevar a cabo el reconocimiento, interaccionando, sin intermediarios, con los antígenos de bacterias o parásitos. Sin embargo, las células *T* aisladas son ciegas. ¿Qué necesitan para reconocer las sustancias foráneas?

HOWARD M. GREY, ALESSANDRO SETTE y SØREN BUUS han colaborado durante mucho tiempo en el estudio de los mecanismos de procesamiento y presentación de los antígenos. Grey es cofundador y director técnico de la Cytel Corporation, en La Jolla, California, una compañía de biotecnología que diseña drogas relacionadas con la inmunología. Se doctoró en medicina por la Universidad de Nueva York en 1957 y ha investigado en la Clínica Scripps, la Fundación de Investigación de La Jolla y en el Centro Nacional Judío de Inmunología y Medicina Respiratoria de Denver. Sette es investigador de la Cytel y profesor de inmunología en la Clínica Scripps. Se doctoró por la Universidad de Roma en 1984 y empezó a colaborar con Grey en el Centro Nacional Judío en 1986. Buus, doctor en medicina por la Universidad de Arhus desde 1981, da clases en el Instituto de Inmunología Experimental de la Universidad de Copenhague.

Desde hace varias décadas se sabe que las células *T* tienen unos requerimientos precisos para reconocer a los antígenos. Otro tipo celular debe actuar como célula accesoria, procesando químicamente al antígeno y presentándolo a la célula *T* en asociación con ciertas proteínas de superficie de las propias células accesorias, las llamadas moléculas CMH (siglas de "complejo mayor de histocompatibilidad"). Inmunólogos y biólogos moleculares continúan indagando con entusiasmo los entresijos del mecanismo de procesamiento de los antígenos, la naturaleza de las moléculas CMH y el papel que éstas desempeñan en la presentación del antígeno a las células *T*. No obstante, sabemos ya bastante sobre este preludio clave de la respuesta inmunitaria. Tales conocimientos nos auguran nuevas formas de control de dicha respuesta. Ello podría ayudar, por ejemplo, a desarrollar vacunas sintéticas y terapias específicas para el tratamiento de enfermedades de autoinmunidad, como la esclerosis múltiple.

Uno de los primeros indicios de que las células *B* y *T* ven a los antígenos de forma fundamentalmente diferente procede de trabajos realizados hace 30 años por P. G. H. Gell y Baruj Benacerraf, a la sazón en la Universidad de Nueva York. Observaron que los anticuerpos (y las células que los producen) específicos contra una proteína foránea en su configuración plegada normal suelen ignorarla, una vez desnaturalizada, esto es, desorganizada o desplegada. Sin embargo, la respuesta inmunitaria "mediada por células", función de las células *T*, era virtualmente la misma, con independencia de que la proteína estuviese en su forma normal o desnaturalizada. En esa época no se conocían aún las células *B* y *T*, pero estos experimentos sugerían, vistas las cosas en retrospectiva, que las células *B* y los anticuerpos que excretan debían reconocer a los antígenos fundamentalmente por su forma, mientras que las células *T* respondían principalmente a su composición, esto es, a la secuencia de aminoácidos de la cadena proteica, que es idéntica cualquiera que sea el tipo de plegamiento de la molécula.

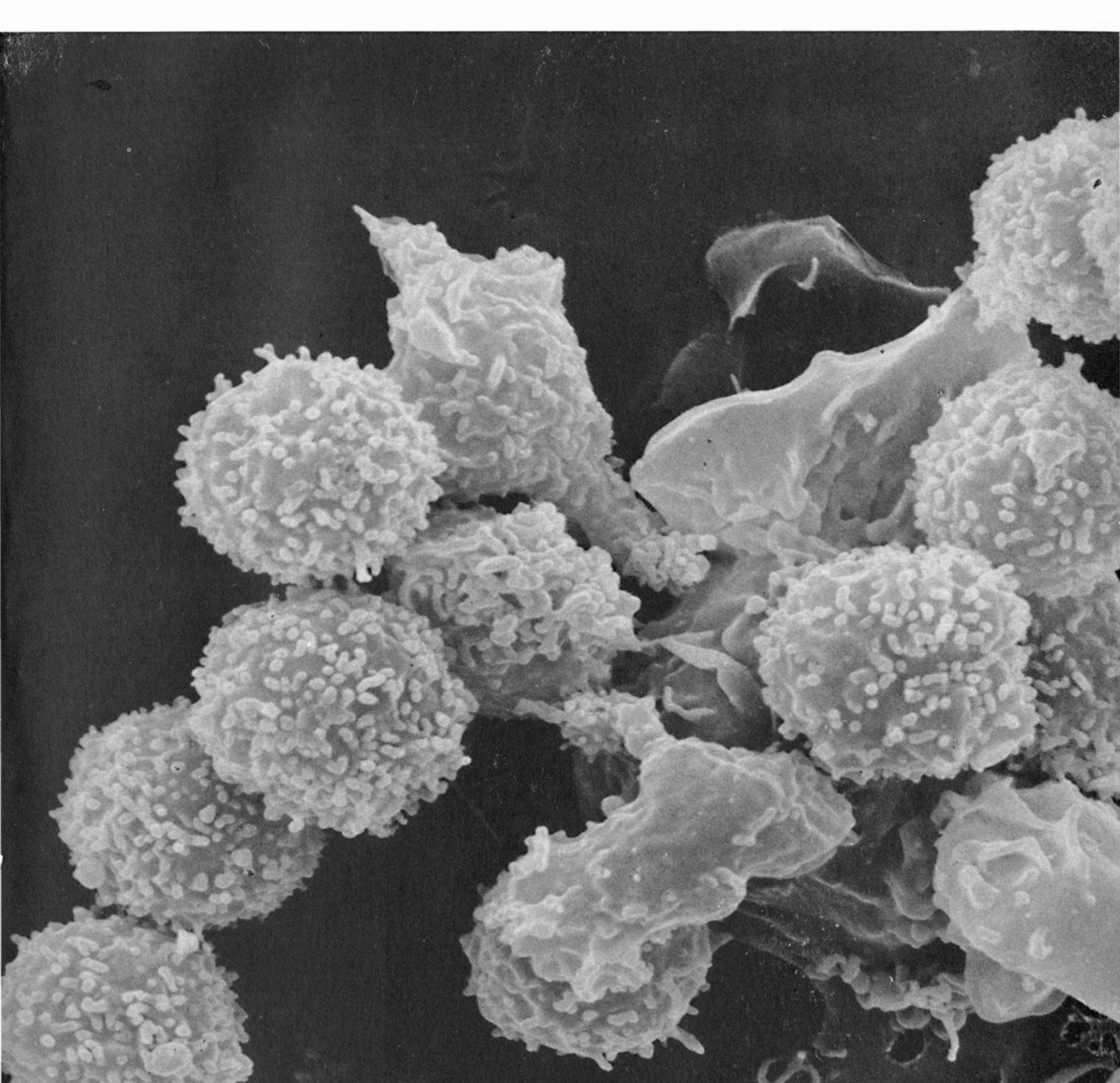
Posteriormente, se comprobó que las células *T* respondían al antígeno sólo cuando una célula accesoria lo

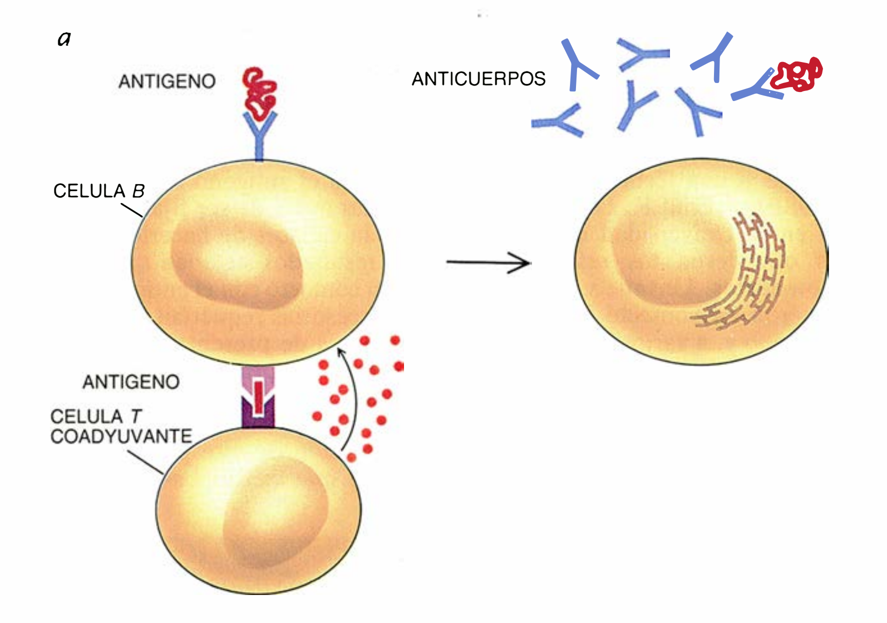
1. RECONOCIMIENTO, por las células *T*, de antígenos situados en la superficie de un macrófago, una célula "basurera". El macrófago ha ingerido una proteína bacteriana, la ha degradado en pequeños fragmentos, que ha agrupado junto con determinadas proteínas de la superficie celular. Las células *T*, pequeñas y esféricas, están programadas para reconocer los antígenos bacterianos, pero sólo lo pueden hacer con la ayuda de los macrófagos. La electromicrografía de barrido fue realizada por Morten H. Nielsen y Ole Werdelin, de la Universidad de Copenhague.

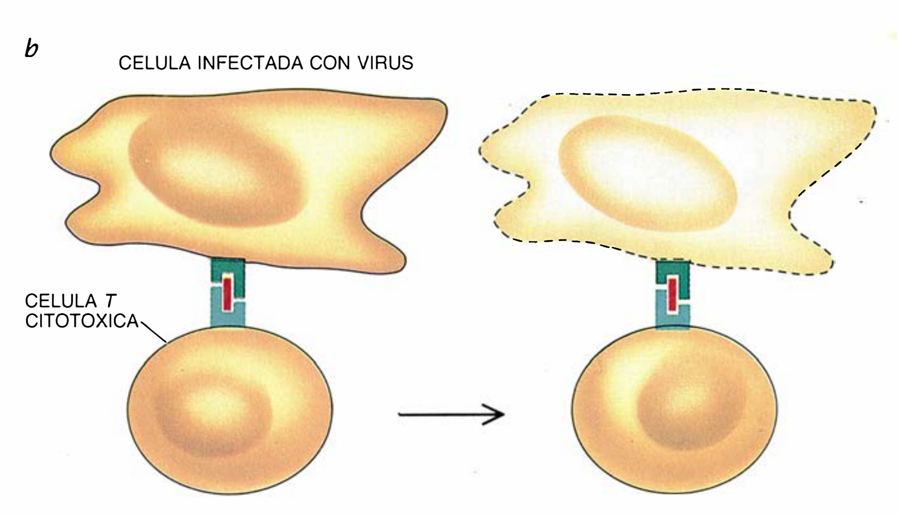
"presentaba". Los macrófagos, células "basureras" del sistema inmunitario, fueron las primeras células accesorias que se identificaron; se sumaron luego a la lista las células dendríticas (células especializadas que se encuentran en nódulos linfáticos y en el bazo), las propias células *B* y, para algunos tipos de reacciones de las células *T*, cualquier tipo de célula nucleada del organismo. La actividad de las células accesorias, o células que presentan a los antígenos (CPA), explica por qué a las células *T* les da igual la forma del antígeno: las CPA fragmentan el antígeno antes de presentarlo, eclipsando su forma y dejando sólo su secuencia característica de aminoácidos.

Varios estudios demostraron que las CPA no se limitaban a capturar al antígeno y exponerlo sobre su superficie. Gracias a una técnica introducida en 1981 por Emil R. Unanue, a la sazón en la Universidad de Harvard, se obtuvieron los resultados más contundentes. Unanue y sus colegas pusieron en contacto las CPA con el antígeno y, a varios intervalos, "fijaron" las células con formaldehído, producto que interrumpe su metabolismo. A continuación, ensayaron la capacidad de las células para presentar el antígeno a las células *T* y activar su proliferación. Las CPA fijadas antes o inmediatamente después de entrar en contacto con el antígeno no podían presentarlo a las células *T*. Por el contrario, las CPA incubadas con el antígeno durante una hora o más antes de ser fijadas, sí se mostraban capaces de hacerlo. Estos y otros resultados sugerían que, tras entrar en contacto con el antígeno, las células accesorias requerían tiempo y energía antes de presentar antígenos a las células *T*, probablemente porque primero debían modificarlo.

Otros experimentos colaboraron a la comprensión de este proceso, demostrando que ciertas bases débiles







2. DOBLE MISION DE LAS CELULAS *T*. Una célula *T* coadyuvante reconoce a un antígeno (*color*) sobre la superficie de otra célula (en este caso una célula *B*) que encontró material foráneo y lo rompió en fragmentos (*a*). La célula *T* responde segregando sustancias que ayudan a otras células del sistema inmunitario a llevar a cabo sus funciones. (Aquí estimula la maduración de la célula *B* y la excreción de anticuerpos.) Una célula *T* citotóxica, o asesina, reconoce antígenos sobre la superficie de una célula infectada con un virus o una célula maligna, y responde aniquilando a la célula efectora (*b*).

inhibían vigorosamente la capacidad de las CPA para presentar el antígeno. Tales compuestos son probablemente activos en los endosomas, compartimentos celulares de medio ácido donde las enzimas proteolíticas digieren el material ingerido. Quizás al neutralizar los endosomas, las bases inhiben la capacidad proteolítica celular. Trabajos posteriores demostraron que inhibidores específicos de enzimas proteolíticas se oponían también a la presentación del antígeno.

La hipótesis según la cual la degradación del antígeno en pequeños fragmentos, o péptidos, es un paso previo para su presentación a las células *T* ganó un apoyo crucial tras un experimento realizado por Richard P. Shimonkevitz, Philippa C. Marrack y John W. Kappler, todos ellos del Centro Nacional Judío de Inmunología y Medicina Respiratoria en Denver, y uno de los autores (Grey). El grupo demostró que, para desencadenar la respuesta inmunitaria mediada por las células *T*, no se necesitaba la proteína intacta: bastaba con utilizar péptidos sencillos derivados de una proteína antigénica. Los péptidos no necesitaban ningún procesamiento ulterior, ya que podían ser presentados por las CPA que previamente habían sido fijadas. Recientemente, Stephane O. Demotz, de nuestro laboratorio en Cytel, ha aislado un antígeno procesado y ha demostrado que se trata en efecto de un péptido corto. En líneas generales, el proceso sería el siguiente: el antígeno es absorbido por una CPA, que lo libera a los compartimentos de carácter ácido, donde se degrada en pequeños péptidos, de unos 10-20 aminoácidos, que tornan a la membrana celular para su reconocimiento.

Esto, no obstante, es sólo un relato parcial del procesamiento antigénico. Las etapas que se han descrito tienen lugar en los tipos específicos de células presentadoras de antígenos –células *B*, macrófagos y células dendríticas–, especializados en el procesamiento de material foráneo capturado del medio circundante. El procesamiento y presentación de tales antígenos "exógenos" suelen conducir a la activación de una población específica de células *T*: las células coadyuvantes que apoyan a las células *B* en la fabricación de anticuerpos.

No todos los antígenos reconocidos por las células *T*, sin embargo, tienen su origen fuera de las células presentadoras. Una célula infectada por un virus o que se haya convertido en maligna puede sintetizar proteínas específicas víricas o tumorales. La inmensa mayoría de las células del organismo pueden presentar proteínas de este tipo, de síntesis interna, que muestran a las células *T* pertenecientes a la segunda gran población: las células *T* citotóxicas. Estos linfocitos responden a los antígenos "endógenos" matando a las células que los producen.

Hasta hace poco muchos investigadores suponían que tales antígenos endógenos no necesitaban ser procesados, ya que sobre la superficie de las células anormales se expresan, con frecuencia, las proteínas intactas. Parecía plausible que las células *T* citotóxicas, a diferencia de las coadyuvantes, se hallaran capacitadas para responder directamente a los antígenos intactos. Sin embargo, Alain Townsend, del Hospital John Radcliffe de Oxford, encontró en 1985 células citotóxicas capaces de matar a células infectadas con un virus que eran también capaces de matar a células sin infectar a las que se les había introducido un simple fragmento de un gen vírico. Estas células genéticamente manipuladas producían sólo una pequeña fracción de la correspondiente proteína vírica hallada en las células infectadas. A pesar de ello, las células citotóxicas respondían de la misma forma ante ambos tipos de moléculas. Townsend indujo más tarde una respuesta citotóxica con CPA no infectadas sometidas a incubación con un corto péptido antigénico; confirmó que las células citotóxicas, lo mismo que las células coad-

yuvantes, reconocían un fragmento de antígeno y no la proteína entera.

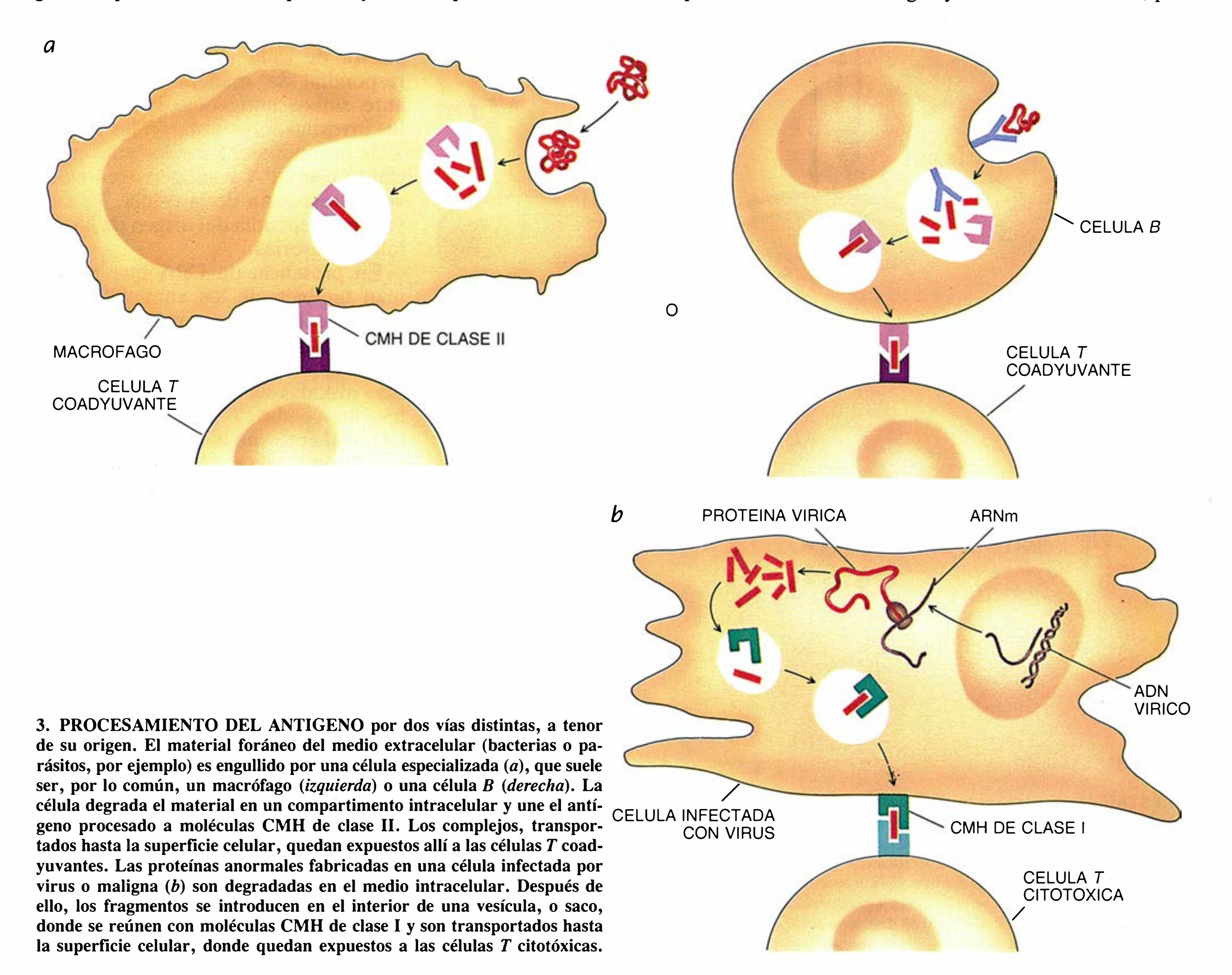
Otros experimentos indicaban, sin embargo, que las células infectadas procesan a los antígenos endógenos mediante un mecanismo bastante diferente del que prepara al antígeno para el reconocimiento por las células coadyuvantes. Las bases débiles que bloqueaban el procesamiento para el reconocimiento por parte de las células *T* coadyuvantes y apuntaban a un papel central de los endosomas en ese mecanismo de procesamiento no ejercían efecto alguno sobre la presentación del antígeno a las células *T* citotóxicas. Más aún, cuando se añadía una proteína antigénica a un cultivo que contenía CPA y células *T* citotóxicas específicas de dicho antígeno, no sucedía nada. Sin embargo, las células asesinas podían reconocer y responder a la proteína cuando ésta se microinyectaba en el citoplasma de las células presentadoras.

Los datos, sin ser del todo definitivos, son los más compatibles con un cuadro en el que el antígeno endógeno se procesa en el citoplasma y no en los endosomas. Una vez degradada la proteína en el citoplasma, los fragmentos se transportan hacia el interior de una vesícula, una suerte de saco convertido en recadero entre el interior celular y su superficie. Así llegan los péptidos hasta la superficie celular, para su reconocimiento por las células *T* asesinas.

Esta segunda ruta de procesamiento, especializada en antígenos fabricados por las propias CPA, podría ser la forma utilizada por el sistema inmunológico para asegurarse de que un organismo foráneo no pueda eludirlo adoptando una estrategia similar a la del caballo de Troya. Aun cuando el patógeno se esconda en una célula, el cuerpo procesará las nuevas proteínas y las expondrá a las células *T*.

Además, la existencia de dos rutas distintas para procesar antígenos, una para antígenos exógenos y otra para endógenos, encierra un sentido biológico: cada ruta conduce a la respuesta apropiada por parte de la célula *T*. Una proteína bacteriana capturada de su entorno por una célula *B*, y procesada por la ruta exógena, pone en marcha la ayuda de células *T*, que permite a la célula *B* fabricar anticuerpos para combatir la infección. Por contra, una proteína foránea o anormal producida por una célula renegada provoca la muerte de la célula errante a manos de las células *T* citotóxicas.

Una vez procesado, el antígeno se dispone sobre la superficie de la célula accesoria, junto con otras proteínas de síntesis de la propia célula. Son las proteínas CMH, denominadas así por el complejo de genes de histocompatibilidad, un cúmulo de más de una docena de genes. Dicho cúmulo es un punto caliente de variabilidad genética, de tal suerte que las proteínas CMH determinadas por una serie concreta de genes casi siempre difieren de un individuo a otro. Las moléculas, no obstante, pueden agruparse en dos grandes clases, según su estructura y función en la estimulación de la célula *T*. Las proteínas CMH de la clase II, encontradas principalmente en la superficie de las células *B*, macrófagos y células dendríticas, par-



3. PROCESAMIENTO DEL ANTIGENO por dos vías distintas, a tenor de su origen. El material foráneo del medio extracelular (bacterias o parásitos, por ejemplo) es engullido por una célula especializada (*a*), que suele ser, por lo común, un macrófago (*izquierda*) o una célula *B* (*derecha*). La célula degrada el material en un compartimento intracelular y une el antígeno procesado a moléculas CMH de clase II. Los complejos, transportados hasta la superficie celular, quedan expuestos allí a las células *T* coadyuvantes. Las proteínas anormales fabricadas en una célula infectada por virus o maligna (*b*) son degradadas en el medio intracelular. Después de ello, los fragmentos se introducen en el interior de una vesícula, o saco, donde se reúnen con moléculas CMH de clase I y son transportados hasta la superficie celular, donde quedan expuestos a las células *T* citotóxicas.

ticipan en la presentación del antígeno a las células *T* coadyuvantes. Las proteínas de la clase I, halladas en casi todas las células nucleadas del cuerpo, desempeñan el mismo papel con las células *T* citotóxicas.

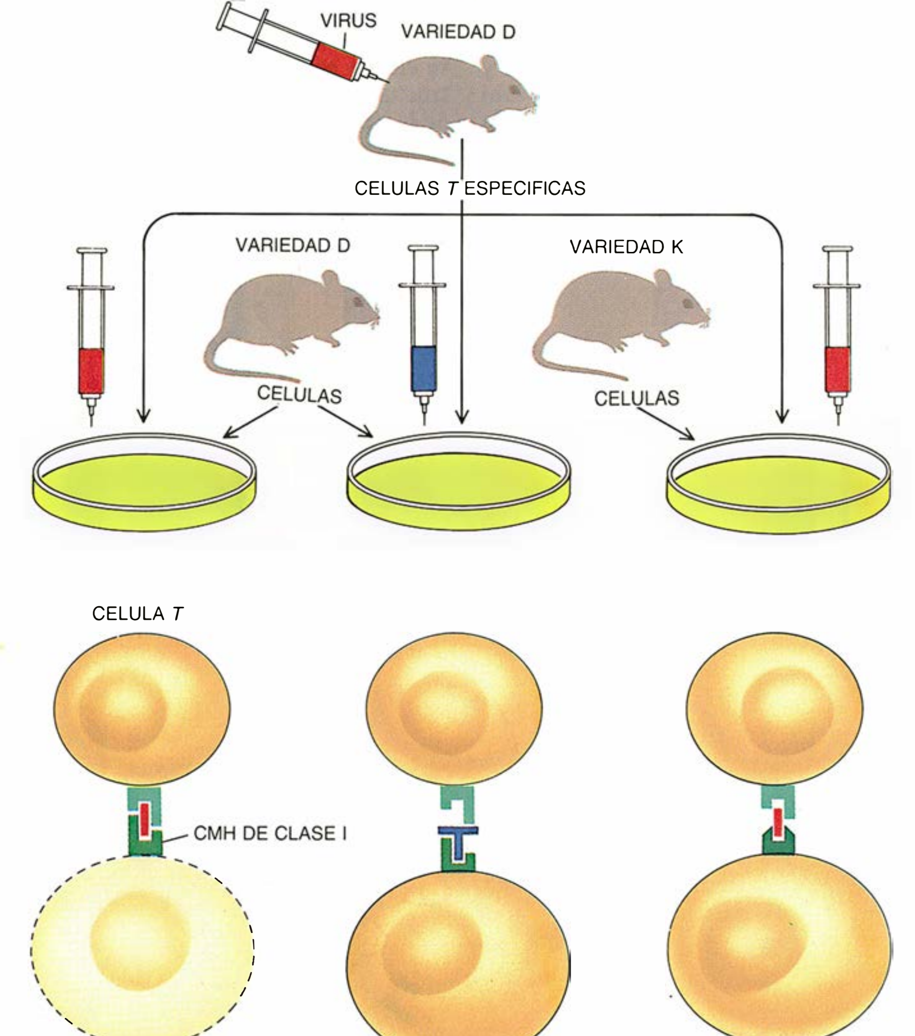
Los conocimientos actuales sobre las moléculas CMH y su participación en la estimulación de la respuesta por parte de las células *T* es el producto de más de tres décadas de investigación, iniciada a mediados de los años cincuenta con los estudios sobre trasplantes de tejidos. Los investigadores encontraron que, cuando se transfería tejido de un animal a otro con diferentes proteínas CMH, el sistema inmunitario del receptor rechazaba el injerto con una reacción de extraordinaria intensidad, cuyo rastreo llevó hasta las células *T*. Parecía como si el sistema inmunitario, y en particular las células *T*, fuese "sintonizado" para reconocer las moléculas CMH. Desde luego, su función inmunitaria normal no debía limitarse al mero rechazo de trasplantes, ya que éstos son muy raros en la naturaleza.

Una de las primeras pistas sobre una de las funciones normales de las proteínas CMH procede de los experimentos realizados en los años sesenta por Hugh O. McDevitt, entonces en el Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Inglaterra, y Benacerraf. Demostraron que los genes de las CMH afectaban a la capacidad de un animal para elaborar una respuesta inmunitaria contra ciertos antígenos simples. El animal portador de una variante de un determinado gen CMH podía responder contundentemente a cierto antígeno; otro que portaba una variante distinta no respondía quizás en absoluto. En estos dos tipos de estirpes, las CMH parecían operar como genes implicados en la respuesta inmunitaria.

¿De qué manera pueden afectar estos genes a la respuesta inmunitaria? La explicación más obvia era que tales genes determinaban las propias moléculas receptoras de las células *T*. En 1973, sin embargo, Alan S. Rosenthal y Ethan M. Shevach, del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas, realizaron una observación que relacionaba las CMH con la función de las células accesorias. Cruzaron una estirpe de cobaya, que respondía bien a un antígeno y escasamente a un segundo antígeno, con otra que presentaba un patrón de comportamiento inverso: respondía con indolencia ante el primero y bien ante el segundo. La descendencia, que había heredado un gen de capacidad de respuesta de cada uno de los padres, respondía de manera contundente ante ambos antígenos. Pero cuando los investigadores aislaron las células *T* de los animales híbridos y las mezclaron con CPA y antígenos en cultivo, la respuesta de la célula *T* coadyuvante dependía del origen de las células accesorias.

En presencia de CPA que provenían también de los animales híbridos, las células *T* respondían a ambos antígenos, tal como se esperaba. Sin embargo, cuando las CPA habían sido aisladas de las estirpes parentales, las células *T* sólo reaccionaban frente al antígeno al cual también respondía la célula parental. Las células se mostraban ciegas ante los otros antígenos. Parecía que los genes CMH no ejercían su efecto a través de las propias células *T* (en condiciones apropiadas las células *T* de los animales híbridos eran perfectamente capaces de responder a ambos antígenos), sino a través de las CPA. De alguna manera, las células accesorias que llevaban los genes sin capacidad de respuesta no podían presentar uno de los antígenos; un fenómeno cuyo mecanismo ha sido recientemente dilucidado.

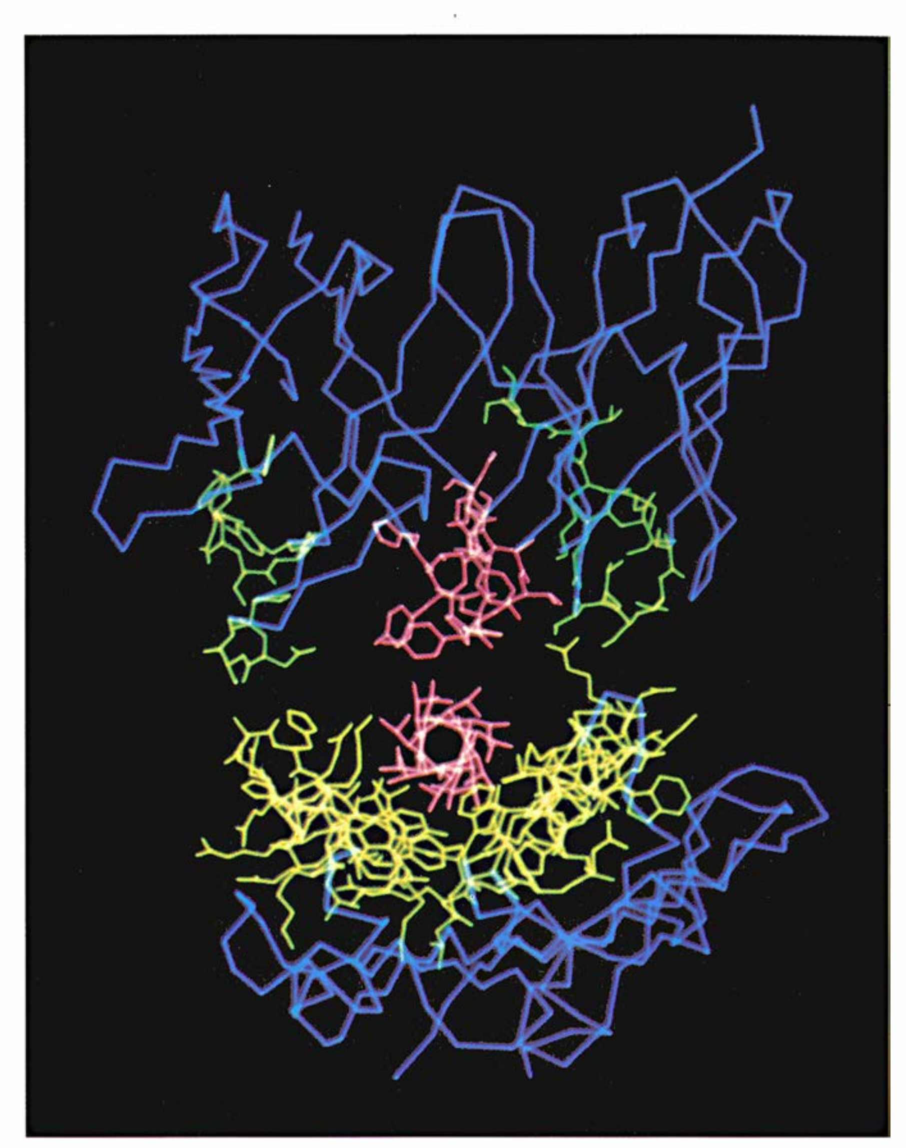
Mientras tanto, los estudios sobre las células *T* citotóxicas llevaron a la conclusión de que las células *T* no sólo reconocían antígenos foráneos, sino también a las proteínas determinadas por los CMH de las células



4. RESTRICCION CMH de la respuesta de células *T*, descubierta por Rolf M. Zinkernagel y Peter C. Doherty, de la Universidad Nacional Australiana, en 1974. Las células *T* necesitan reconocer un antígeno específico y una proteína CMH, asimismo específica. Los investigadores infectaron ratones de una variedad o estirpe CMH específica con un virus y aislaron células *T* citotóxicas específicas de ese virus. En cultivo, tales linfocitos podían matar las células de ratones sin infectar de la misma estirpe o variedad cuando se infectaban las células con el mismo virus (*placa de la izquierda*), pero no cuando se infectaban con un virus distinto (*placa del centro*). Tampoco mataban las células de otra estirpe que portaba el mismo virus, aunque una proteína CMH distinta (*placa de la derecha*).

accesorias. Así, en 1974, Rolf M. Zinkernagel y Peter C. Doherty, de la Universidad Nacional Australiana, expusieron células *T*, que habían respondido a antígenos presentados por células que portaban una variante particular de proteína CMH de clase I, al mismo antígeno presentado por células que portaban una variante CMH distinta. Los investigadores comenzaron por infectar un ratón con un virus, estimulando de ese modo las células *T* citotóxicas que respondían a las células infectadas por el virus. Aislaron luego las células *T* específicas y las expusieron *in vitro* a células infectadas procedentes de otro ratón.

Zinkernagel y Doherty observaron que, si las proteínas CMH de clase I presentes en la superficie de estas nuevas células infectadas diferían de las del ratón original, las células escapaban al exterminio por parte de las células *T*. E interpretaron los resultados en el sentido de que las células *T* de un animal debían reconocer dos entidades para responder: el antígeno y una proteína CMH específica, esto es, característica de las propias células del animal. Confirmado por muchos otros experimentos, este requisito del doble reconocimiento de un antígeno y una molécula CMH "propia" recibió el nombre de restricción CMH.



5. CO-RECONOCIMIENTO de antígeno y proteína CMH, según un modelo realizado por Mark M. Davis y Pamela J. Bjorkman, adscritos a la Universidad de Stanford. Un receptor de célula *T* se acerca por arriba y encuentra un péptido foráneo (*rueda espiculada rosa*) en la hendidura de la proteína CMH (*canal amarillo*), donde se une el antígeno. Los receptores de las células *T* incluyen regiones que son bastante constantes (*amarillo*), que interaccionan con la exigua gama de proteínas CMH del organismo, y una región altamente variable (*rosa*), para reconocer antígenos diversos.

Esta restricción CMH de la respuesta de las células *T* llevaba parejo un nuevo enigma. Las células *B* son activadas por el ajuste de una única llave (el antígeno) en una única cerradura (el receptor alojado en la superficie de las células *B*). ¿Cuál podría ser el diseño molecular del doble sistema llave-cerradura de las células *T*? Según una teoría, las células *T* portaban dos moléculas receptoras independientes, una específica para el antígeno y la otra para una proteína CMH autóctona. A tenor de otra teoría, las células *T* portaban una sola molécula receptora capaz de identificar a ambos, antígeno y CMH. Ambas teorías se acompañaban con sus respectivas pruebas indirectas; la controversia terminó por saldarse a favor del modelo de un solo receptor, cuando se demostró que un único receptor de células *T* podía ser específico tanto para el antígeno como para una CMH autóctona [véase "La célula *T* y su receptor", por Philippe Marrack y John Kappler; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1986].

La existencia de un único receptor sugería que el antígeno procesado y la molécula CMH podrían formar un complejo, esto es, una entidad que sería reconocida por un solo sitio del receptor de la célula *T*. De esta manera, la proteína CMH actuaría de receptor primario para el antígeno procesado; el complejo resultante interaccionaría entonces con un segundo receptor, en la célula *T*. Ya que tanto el antígeno como el CMH contribuirían a dar forma a las características moleculares del complejo, el mecanismo propuesto explicaría de manera airosa la especificidad de las células *T* por el CMH y el antígeno. Podría explicar también el enigma planteado en los primeros estudios, esto es, la particular ceguera determinada por ciertos genes CMH frente a antígenos específicos. En este nuevo planteamiento, tales genes pueden codificar proteínas incapaces de unirse a ciertos péptidos y presentarlos.

Ronald H. Schwartz, del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas, proporcionó pruebas importantes, aunque indirectas, en favor de la formación de tal complejo. Estudió la capacidad de ratones pertenecientes a diferentes estirpes de CMH para responder frente a variantes de una determinada proteína. Descubrió que, mientras una variante específica podía desencadenar una respuesta de las células *T* en una de las estirpes aunque no en la otra, una diferencia de unos pocos aminoácidos en la secuencia de la proteína podría hacerla reconocible por el sistema inmunitario de la segunda estirpe. Schwartz concluyó que tales resultados se explicaban mejor si se suponía que la proteína –o un péptido deri-

vado de ella– debía unirse a las moléculas CMH antes de que pudiese desencadenar una respuesta. La ligera diferencia en la secuencia de aminoácidos permitía que el péptido se uniese a las moléculas CMH de la segunda estirpe.

En 1985, Unanue y sus colegas de la Universidad de Washington demostraron de una manera directa la formación del complejo; utilizaron para ello la técnica de diálisis de equilibrio. Una cámara que contenía un péptido antigénico se separó mediante una membrana semipermeable de otra cámara que contenía la molécula CMH de clase II que restringía la respuesta inmunitaria al antígeno. Este, con mucho la molécula menor, podía atravesar la membrana, pero la proteína CMH quedaba confinada en uno de los compartimentos. A igualdad de condiciones, el antígeno debería haberse difundido a través de la membrana hasta que su concentración en las dos cámaras fuese la misma. No ocurrió así, ya que al final su concentración fue mayor en la parte que contenía también la proteína CMH. Era evidente que ambas moléculas terminaban uniéndose.

Nuestro grupo demostró la existencia del mismo tipo de interacciones en diversos péptidos y moléculas CMH de clase II. Observamos también que la unión era crítica para la respuesta inmunitaria: las células *T* reconocían complejos de CMH y antígenos. Utilizando una técnica desarrollada en el laboratorio de Harden M. McConnell, de la Universidad de Stanford, incluimos complejos CMH-antígeno dentro de una membrana lipídica artificial, esto es, una membrana de una célula simulada. Preparamos también, como referencia, membranas que contenían CMH, inmersas en una solución de antígenos libres, sin formar complejos. Los complejos estimulaban a las células *T* específicas de esos antígenos con una eficacia 20.000 veces superior que la de la mezcla de CMH y antígenos libres.

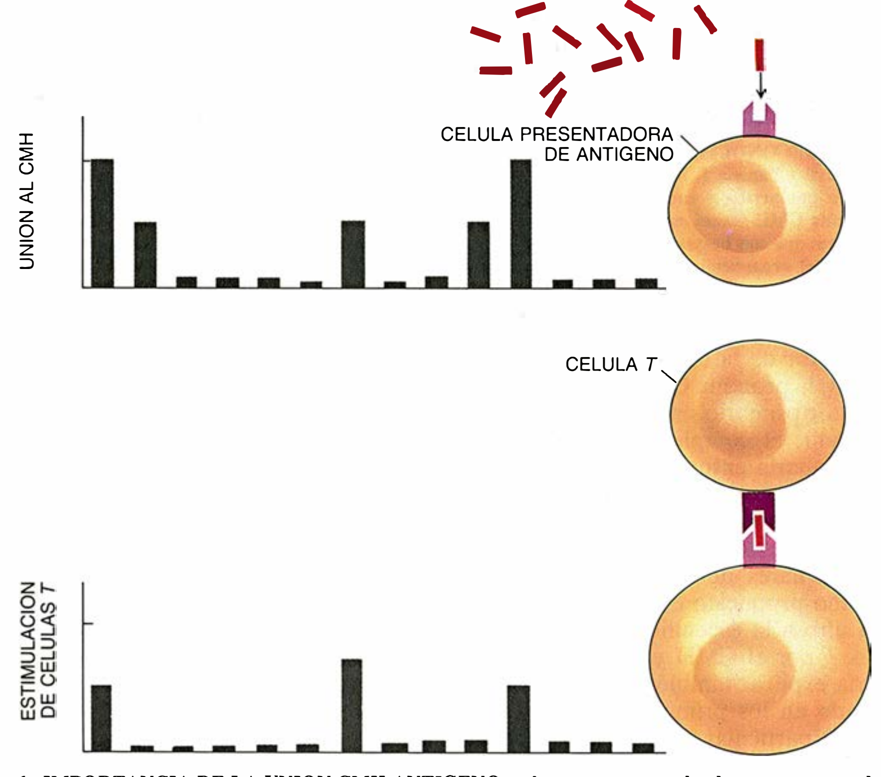
Para que tales complejos intervengan en la respuesta inmunitaria normal deben ser bastante estables: en cada individuo, sólo unas pocas células *T* portan receptores específicos para un determinado antígeno, de suerte que, tras la exposición de un individuo a este antígeno, puede transcurrir cierto tiempo antes de que una célula *T* específica encuentre a una CPA que porte el complejo antígeno-CMH. El éxito de nuestro experimento abonaba la estabilidad real de los complejos, pues tardamos más de un día en aislar los complejos CMH-antígeno e incluirlos en la membrana lipídica. La medición directa de la tasa de disociación de los complejos confirmó su estabilidad: a la temperatura corporal, su vida media era de unas 10 horas.

A pesar de la solidez de las pruebas en favor de la formación del complejo, no se aceptó unánimemente la propuesta posterior de que la falta de respuesta genética, que algunos investigadores como Rosenthal y Shevach habían estudiado, podía deberse a un fallo en la unión entre algunas proteínas CMH y ciertos antígenos. Experimentos con diferentes antígenos no siempre apoyaban las conclusiones de Rosenthal y Shevach de que la ceguera inmunitaria refleja una carencia en las células que presentan el antígeno. Algunos investigadores señalaban, además, que era difícil averiguar de qué manera una sola proteína CMH podía actuar de receptor específico para legiones de péptidos antigénicos estructuralmente distintos.

Cada individuo cuenta, como mucho, con una docena de proteínas CMH. Pero, ¿cómo pueden ser tan selectivas esas proteínas cuando cada una debe unirse a una porción considerable de un vasto universo de antígenos potenciales? Según este punto de vista, los complejos CMH-antígeno, si existen, deberían formarse inespecíficamente. Las variaciones en la capacidad de respuesta inmunitaria deben reflejar algún otro tipo de mecanismo que no sea la mera unión selectiva.

Algunos investigadores avanzaron una explicación alternativa: el CMH influía en la respuesta inmunitaria moldeando el repertorio de células *T* funcionales. Las células *T* maduran en la glándula del timo, en cuyo proceso interaccionan con las proteínas CMH alojadas en la superficie de células accesorias en dicha glándula. Durante esta "educación" tímica, las células *T* aprenden a reconocer el antígeno sólo cuando se hallan asociadas con las propias moléculas CMH del organismo. Al mismo tiempo, se piensa, las células *T* que se unen con demasiada avidez a las CMH autóctonas –y plantean por tanto la amenaza de una reacción de autoinmunidad– son eliminadas o al menos inactivadas. Entra dentro de lo razonable que una variante particular de una proteína CMH autóctona acabe por eliminar todas las células *T* capaces de reaccionar frente a un determinado antígeno. Cualquier individuo que herede el correspondiente gen CMH exhibirá el mismo "agujero" en su repertorio de células *T*.

Sometimos a prueba las influencias relativas de las uniones de las CMH y



6. IMPORTANCIA DE LA UNION CMH-ANTIGENO en la puesta en marcha de una respuesta de células *T*, según un ensayo realizado por los autores. Sintetizaron 14 péptidos que representaban fragmentos de una proteína y midieron la afinidad de cada uno de ellos por una molécula CMH de ratón (*arriba*). Cinco de los péptidos se unían a la molécula. Tres de éstos estimulaban una respuesta de células *T* en un ratón de la misma variedad (*abajo*). La unión a una proteína CMH parece condición necesaria, aunque no suficiente, para que un péptido desencadene una respuesta inmunitaria.

los agujeros del repertorio de células *T* en la capacidad de respuesta inmunitaria. Para ello, comparamos la capacidad de unión de los péptidos a una molécula CMH de ratón con su capacidad para inducir una respuesta inmunitaria. De una serie de 14 péptidos, que juntos representaban una molécula proteica completa, cinco podían unirse a la proteína CMH, y se observó que tres de estos cinco desencadenaban una respuesta de células *T* en animales de la misma estirpe CMH. Ninguno de los péptidos incapaces de unirse estimulaban una respuesta.

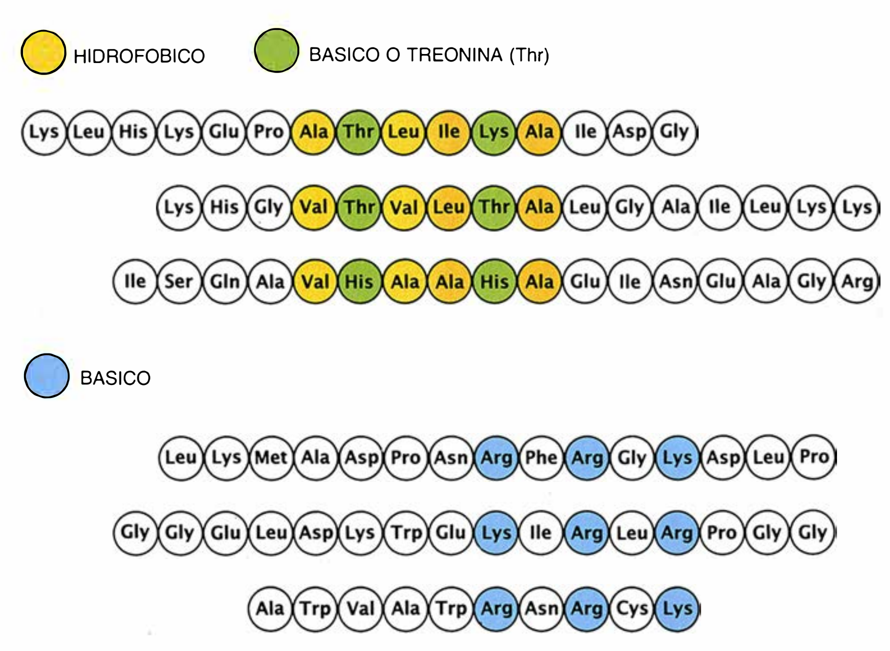
La selectividad de las proteínas CMH moldea, por tanto, la respuesta inmunitaria. Pero no todos los péptidos que pueden unirse a una CMH autóctona provocan una respuesta; algunos antígenos que se unen son incapaces de provocarla, al parecer debido a la ausencia de las células *T* que puedan reconocer el complejo antígeno-CMH. Las dos teorías sobre la influencia de los genes CMH en la respuesta inmunitaria parecen correctas. La selectividad de unión de las proteínas CMH a los antígenos en combinación con los agujeros en el arsenal de células *T* establecen los límites de la capacidad de respuesta inmunitaria de un individuo.

Pero las objeciones iniciales contra la idea que erigía a las proteínas CMH en receptores antigénicos específicos no habían perdido valor. ¿Cómo puede una proteína CMH unirse selectivamente a muchos antígenos, aunque no a todos? Descubrimos que una molécula CMH típica estaba capacitada para unirse con una fracción, que oscilaba entre el 10 y el 20 por ciento, de los fragmentos peptídicos de cualquier molécula proteica. Identificamos también una posible base para esta amplia, aunque selectiva, capacidad de unión: los péptidos atrapados por una molécula CMH particular compartían características estructurales sencillas.

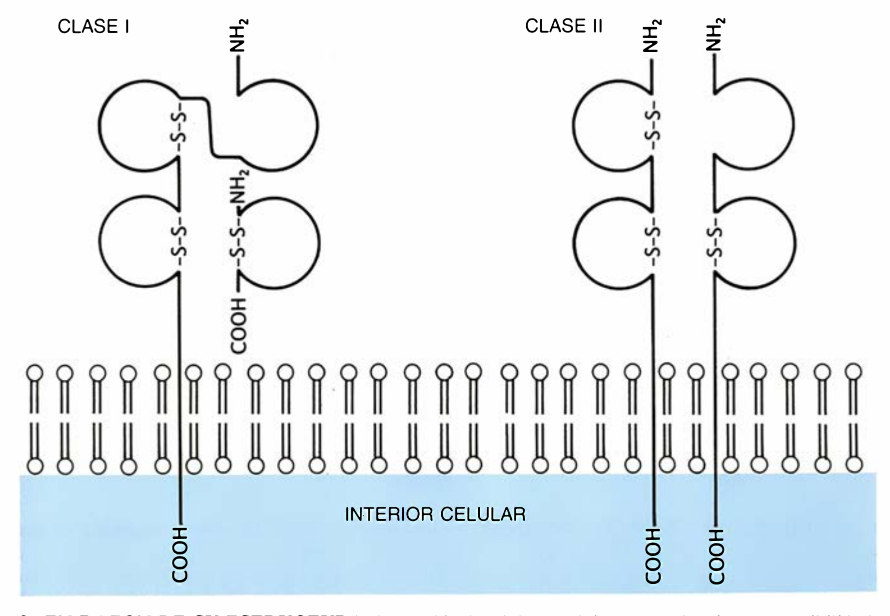
Una molécula CMH, por ejemplo, atrapa péptidos que comparten cierto modelo de residuos hidrofóbicos repetidos, esto es, aminoácidos con afinidad por un medio no acuoso. Otra molécula CMH atrapa péptidos que poseen en común un trío de residuos cargados positivamente. Quizás esta especificidad amplia y diversa faculta a la gama de proteínas CMH de un individuo para unirse y presentar la variedad de antígenos más rica posible, de tal manera que resulte improbable que una sustancia foránea pase inadvertida a las defensas del sistema inmunitario.

En 1987 se confirmó que las moléculas CMH sirven de receptores para los antígenos procesados y exportados a la superficie celular, cuando Don C. Wiley y sus colegas, de la Universidad de Harvard, resolvieron la estructura tridimensional de una molécula CMH de clase I. La característica más notable de la estructura, determinada a partir del patrón de difracción de rayos X de un cristal de la proteína, es una hendidura en la parte superior de la molécula, que se orientaría hacia el exterior, desde la superficie celular. Dos regiones helicoidales de la proteína forman las paredes de la hendidura; las llamadas hojas beta, estructuras en las que la cadena de proteína se pliega en un plano, forman el suelo o fondo de la hendidura.

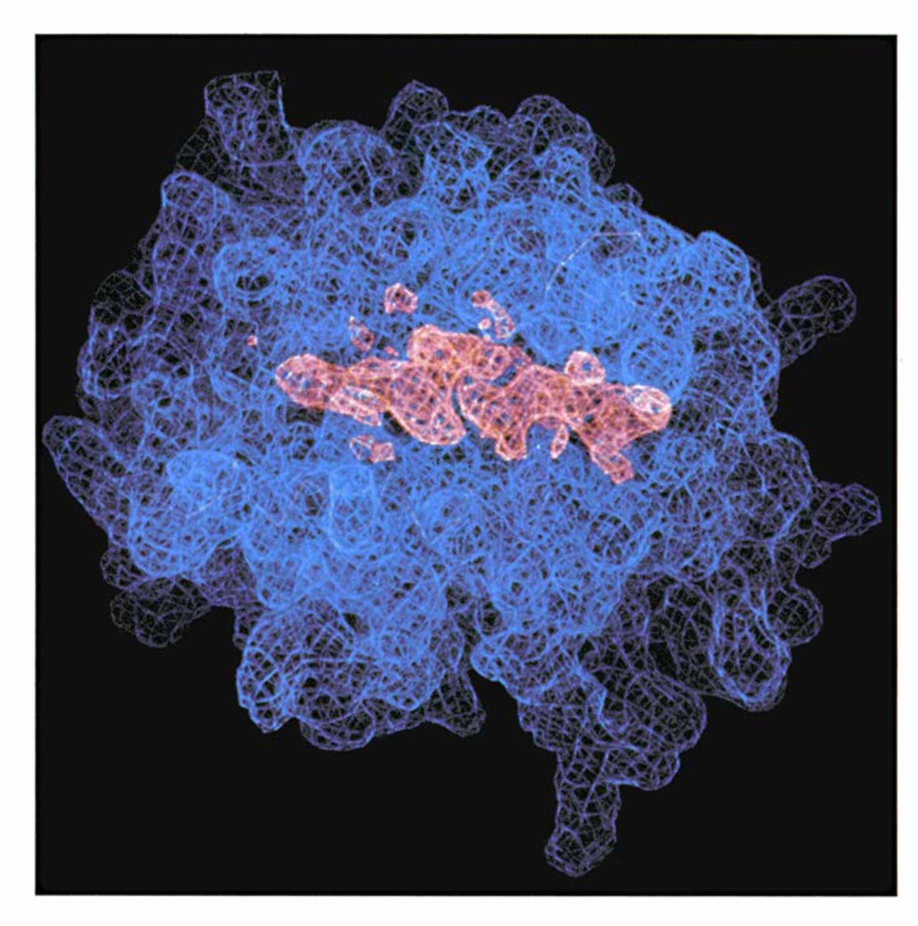
La hendidura *parece* el sitio de unión de los péptidos antigénicos. Más aún. Muchos de los aminoácidos variables que singularizan a una pro-

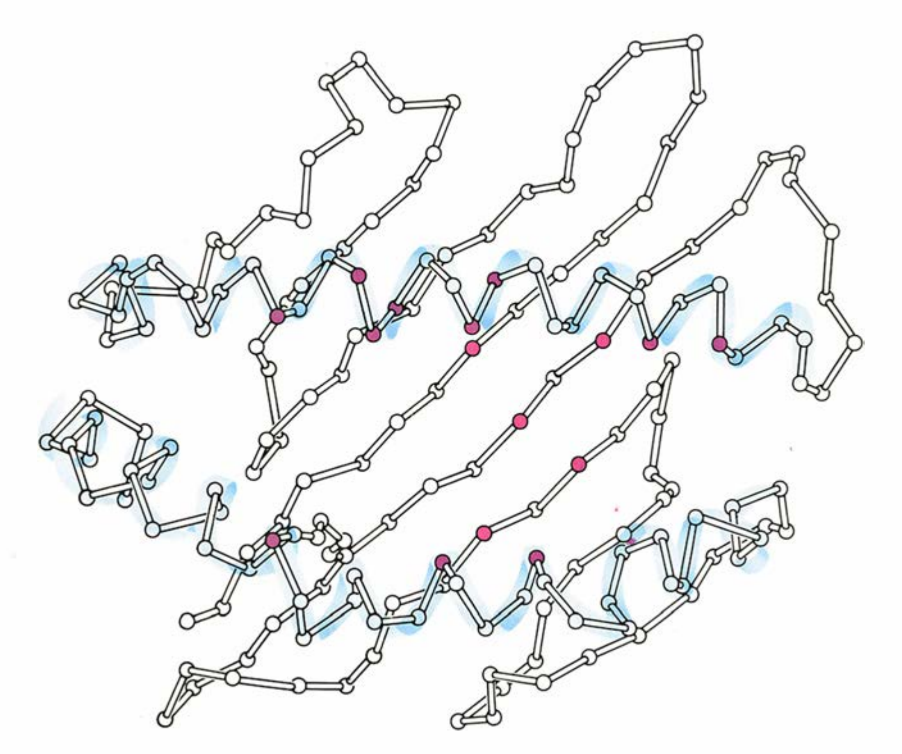


7. MOTIVOS ESTRUCTURALES DISTINTIVOS que caracterizan a los péptidos con capacidad de unión a determinadas proteínas CMH. Los tres péptidos de la parte superior se unen eficazmente a una molécula CMH; los tres de la parte inferior se asocian a otra molécula CMH. Los péptidos de cada grupo comparten un mismo patrón, definido por las propiedades químicas de sus aminoácidos.



8. EN RAZON DE SU ESTRUCTURA, las moléculas del complejo mayor de histocompatibilidad, en las de clase I, que encontramos en la mayoría de las células, y las de clase II, alojadas sólo en presentadoras de antígenos. Cada proteína consta de dos cadenas. En las moléculas de la clase I, una cadena atraviesa la membrana celular y la otra permanece en el exterior; en las moléculas CMH de la clase II, ambas cadenas la atraviesan. Enlaces entre átomos de azufre (*S*) dividen las cadenas en dominios que dibujan bucles. En las proteínas de ambas clases el sitio de unión está situado en los bucles superiores.





9. HENDIDURA DE UNION AL ANTIGENO en una molécula CMH de clase I, mostrada en dos imágenes basadas en el análisis por rayos X de la proteína: un modelo de ordenador (*arriba*) y un diagrama (*abajo*), donde la hendidura queda situada entre las dos hélices. El descubrimiento de una sustancia distinta (coloreada en naranja en la imagen de ordenador) alojada en la hendidura, apoya la propuesta de que éste es el sitio donde se une el antígeno. Además, muchos de los aminoácidos variables (indicados en rojo en el diagrama) que afectan la capacidad de unión al antígeno de una molécula CMH particular están agrupados en la zona de la hendidura. Don C. Wiley, de Harvard, y sus colegas Pamela J. Bjorkman, Mark A. Saper, Boudjema Samraoui, William S. Bennett y Jack L. Strominger determinaron la estructura molecular y proporcionaron la imagen de ordenador.

teína CMH en individuos diferentes y afectan a la capacidad de respuesta inmunitaria se agrupan en las paredes internas y en el fondo de la hendidura. Esos aminoácidos influyen presumiblemente en la capacidad de unión de péptidos de la proteína; cabría, pues, esperar que delimitasen el sitio de unión.

Una segunda observación apuntaba también hacia la hendidura como sitio de unión de los péptidos y planteaba una nueva posibilidad, sugestiva, sobre la función de las moléculas CMH. La hendidura no estaba vacía: en su interior, Wiley y sus colegas identificaron otra entidad molecular. El material debía estar unido ya a las moléculas CMH cuando éstas cristalizaron; con toda probabilidad, era un fragmento de antígeno procesado.

Paul M. Allen, de la Universidad de Washington, y nuestro propio grupo han confirmado que el sitio de unión en las proteínas CMH de las células accesorias está habitualmente ocupado. El tratamiento con ácido de las moléculas CMH de clase II purificadas a partir de células *B* liberaba péptidos que podían luego volver a unirse específicamente a las moléculas CMH. Y lo que reviste mayor interés, Townsend y sus colaboradores acaban de demostrar que una célula no puede ni siquiera ensamblar correctamente las moléculas CMH de clase I, a menos que, durante las etapas finales del proceso de plegamiento de la proteína, esté presente un péptido. Con toda probabilidad, estos péptidos omnipresentes son fragmentos de proteínas autóctonas del organismo, sintetizados en la célula o capturados en su entorno, que han sido procesados y presentados por los mismos mecanismos que exhiben a los antígenos foráneos.

Esta propuesta es compatible con la teoría de la vigilancia inmunitaria, según la cual las células *T* asesinas controlan de manera permanente a las demás células del cuerpo, y, si aparecen antígenos tumorales o víricos, eliminan de inmediato a las células que los expresan. Las células, procesando y presentando de forma continua sus propios antígenos, invitan así a la inspección por el sistema inmunitario, de suerte que éste detecte de inmediato cualquier aberración.

Este modelo de autoescrutinio constante sugiere una respuesta a la inevitable pregunta sobre la presentación del antígeno a las células *T*: ¿por qué requiere tanta elaboración? ¿Por qué las células *T* no reconocen directamente el antígeno, como hacen las células *B*, y necesitan que se fragmente y se exhiba en el contexto

de las moléculas CMH? Una posible respuesta, en el caso de las células *T* citotóxicas, es que el fenómeno de restricción CMH las atrae a los tejidos del propio cuerpo donde, tratándose de células asesinas, está proyectado que actúen. Como las células están "interesadas" tanto en las CMH propias como en los antígenos, buscan a éstos en el marco preciso en el que puedan responder a ellos con eficacia.

Para el esquema, no menos complicado, de la presentación del antígeno ante las células *T* coadyuvantes, se puede invocar una explicación evolutiva. La inmunidad mediada por células parece venir de antiguo; hasta organismos tan primitivos como las esponjas reconocen e impiden la invasión de células de especies diferentes. Por tanto, las células *T* pueden haberse originado como células asesinas, y aunque luego adquiriesen un papel adicional, de ayuda, conservaron la añeja predisposición a buscar antígenos en la superficie celular, asociados con proteínas autóctonas del organismo. En el curso de la evolución, este interés por las proteínas autóctonas se adaptó a la función de las células coadyuvantes, de tal forma que las proteínas CMH de clase II guían ahora a estas células *T* hacia el lugar donde puedan intervenir con la máxima eficacia: a las células *B*, blanco primario de la célula *T* coadyuvante.

Aunque el cuadro del procesamiento y presentación de los antígenos dista mucho de estar acabado, el grado de conocimiento del fenómeno ha avanzado de modo espectacular. Gracias a ello, se abren nuevas posibilidades de manipulación del sistema inmunitario con fines clínicos: por ejemplo, la estimulación de la inmunidad con vacunas y su supresión selectiva en las enfermedades de autoinmunidad.

Tradicionalmente, las vacunas consistían en el organismo patógeno completo, vivo o muerto, o en una proteína extraída del mismo. Para algunas enfermedades, como la malaria, tal procedimiento no es posible, y algunas vacunas con organismos enteros comportan efectos secundarios arriesgados. En tales casos, los farmacólogos se proponen diseñar péptidos sintéticos (que representan sólo una parte pequeña del antígeno real) que provoquen una respuesta inmunitaria equivalente. Para lograrlo, los péptidos deben estimular a las células *T* coadyuvantes y citotóxicas, así como a las *B*; resulta, por tanto, decisivo que tales antígenos se unan a moléculas CMH, con independencia de la variación individual. El conocimiento profundo de las interacciones antígeno-CMH prestará un servicio valioso en la creación de tales vacunas peptídicas.

Podría también echarle una mano al tratamiento de la diabetes dependiente de insulina, la artritis reumática y la esclerosis múltiple, enfermedades en las que el sistema inmunitario pierde su capacidad de distinguir lo propio de lo ajeno, y responde a las propias moléculas del organismo. Algunas de estas enfermedades afectan, de manera casi exclusiva, a personas que portan genes CMH específicos. Las correspondientes proteínas CMH podrían intervenir en las enfermedades, presentando autoantígenos que provoquen una respuesta inmunitaria.

La tecnología basada en las CMH permitirá desarrollar compuestos que se unan enérgicamente a las proteínas CMH asociadas con las enfermedades. Bloqueando la unión de los autoantígenos, tales compuestos pueden suprimir la respuesta autoinmunitaria. Ya es posible detener el curso de algunas de estas enfermedades mediante un agente inmunosupresor (la ciclosporina, por ejemplo) que bloquea, de manera general, la respuesta inmunitaria. Un agente bloqueante dirigido hacia una variante CMH específica, sin embargo, tendría la ventaja de que no afectaría al sistema inmunológico y éste mantendría la capacidad de defender el organismo ante las amenazas externas. Un conocimiento más profundo de los mecanismos de procesamiento y presentación de los antígenos podría así aportar, a la lucha contra las enfermedades de autoinmunidad, algo de la propia precisión y poder del sistema inmunitario.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANTIGEN PRESENTING FUNCTION OF THE MACROPHAGE. Emil R. Unanue en *Annual Review of Immunology*, vol. 2, págs. 395-428; 1984.

ANTIGEN PRESENTATION PATHWAYS TO CLASS I AND CLASS II MHC-RESTRICTED T LYMPHOCYTES. Thomas J. Braciale et al. en *Immunological Reviews*, n.º 98, págs. 95-114; agosto de 1987.

THE INTERACTION BETWEEN PROTEIN-DERIVED IMMUNOGENIC PEPTIDES AND IA. Søren Buus, Alessandro Sette y Howard M. Grey in *Immunological Reviews*, n.º 98, págs. 115-141; agosto de 1987.

STRUCTURE OF THE HUMAN CLASS I HISTOCOMPATIBILITY ANTIGEN, HLA-A2. P. J. Bjorkman et al. en *Nature*, vol. 329, n.º 6139, págs. 506-512; 8 de octubre de 1987.

Ciencia y sociedad

Baño ritual judío

Importancia en la vida comunal. *Miqvé* significa literalmente piscina de agua corriente o agua de lluvia. Su objeto es volver pura a una persona impura por contacto con muertos, con otra persona impura o por algún flujo impuro de su cuerpo, especialmente el menstruo. En la época del Templo lo usaba el sumo sacerdote para proceder a su purificación antes de entrar en el "sancta sanctorum". Posteriormente pasó a ser utilizado sólo por la mujer en estado de *niddá* o de impureza.

La mujer no puede volver a tener relaciones sexuales después del menstruo hasta que no haya procedido a la purificación. Asimismo, es utilizado la víspera de la boda y después del parto. En tiempos bíblicos y postbíblicos tuvo además otros usos. Es empleado también cuando una persona se convierte al judaísmo, debiendo hacer un baño por inmersión en el *miqvé*. También se purifican en ella los objetos de uso ritual realizados por no judíos.

"Según la ley pública, cualquier masa de agua encauzada es apta para un *miqvé* en tanto contenga la cantidad suficiente para que una persona pueda sumergirse en ella. Un *miqvé* que no contenga 20 se'ah (entre 250 y 1000 litros) queda invalidado"; "el miqvé es válido sea cual fuere su construcción si no es prefabricado..."; "puede estar tallado en la roca o construido o colocado en el terreno y cualquier material es válido. Tiene que ser impermeable el agua porque los derrames le invalidan"; "al principio se estableció que debía medir 1,20 metros de altura para permitir que una persona en pie quedara totalmente inmersa, aunque tuviera que doblar las rodillas; más adelante se estableció que con tal que contuviera la cantidad necesaria de agua mínima, la inmersión era válida aunque tuviera que tumbarse". (Los textos entrecomillados son de la *Encyclopedia judaica*, vol. 11; Jerusalén, 1971.)

El *miqvé* es uno de los servicios o dependencias comunales que debe tener una sinagoga junto con la escuela talmúdica o *bet-ha midraš*, el tribunal rabínico o *bet-din*, la sala de reuniones, el pozo comunal, el horno, la carnicería, la sociedad encargada de enterrar a los muertos, hospedería y orfanato, entre otros.

Recuerda Israel Abrahams en *Jewish Life in the Middle Ages*: "Había dos tipos de baño comunal, el baño ritual o *miqvé* y el baño público normal. *Ninguna comunidad carecía del primero* y como el estado prohibía muchas veces que los judíos se bañaran en los ríos utilizados por los cristianos, muchas congregaciones tenían por fuerza un baño público".

Es una institución que no ha perdido su vigencia. A tal efecto y a una consulta efectuada por el Museo Sefardí de Toledo, nos respondía Sara Sananes, esposa de José Israel, de la comunidad israelita de Madrid: "El *miqvé* es un depósito de una vertiente de lluvia o agua obtenida por nieve derretida o hielo natural. Por ello no es una simple bañera, puesto que no está construida como para contener agua proveniente de una fuente natural.

"Se utiliza para hacer la *tebila*, inmersión o baño ritual. Antes de este baño ritual hay que realizar unos preparativos para la higienización del cuerpo. Así, primero se realizará un baño en una bañera normal lavándose cuidadosamente todo el cuerpo, el cabello, las uñas sin esmalte, los dientes, etc. Después se ducha para que no quede residuo alguno. Una vez realizado todo esto se procede a la *tebila* o inmersión en el *miqvé* en presencia de otra mujer. Esta mujer puede ser la del rabino u otra persona, pues su misión es la de revisar que todo el cuerpo esté sumergido, incluso los cabellos, y que se diga correctamente la bendición. Inmediatamente después de la inmersión deberá recitar en hebreo la siguiente bendición: 'Bendito seas Tú Dios nuestro, Señor Rey del Mundo, que nos ha santificado con sus preceptos y nos ha ordenado lo concerniente a la *tebila*'. Es práctica usual repetir la inmersión después de recitada la oración. El *miqvé* propiamente dicho, con sus medidas presentes y su fuente de agua, es una institución muy antigua ordenada en la Biblia y usada muchísimo por hombres y mujeres en la época de los dos Templos.

"Hoy en día se usa el *miqvé* para la pureza de la mujer, esto es, después de concluir cada menstruación y de transcurrir siete días limpios, es decir, sin signo alguno de hemorragia. Por ello, se utiliza en la última menstruación antes de la boda para llegar a ella purificada, y se fijará la fecha de la boda para que caiga uno o dos días después de realizar la *tebila*. Con este acto, el esposo y la esposa reconocen de modo profundo y simbólico que su relación es santa y bendita, pura no vulgar, sagrada y no solaz.

"En realidad, hoy, a excepción hecha de las mujeres muy religiosas o mejor dicho muy practicantes, el *miqvé* se usa antes de la boda; en Madrid y en muchas otras comunidades es obligatorio para contraer matrimonio religioso. En Marruecos y otras ciudades pequeñas, en la *tebila* antes de la boda se reunían las mujeres y daban regalos a la novia: era como una actual despedida de soltera."

Todas estas prescripciones aparecen documentadas en la Biblia primero y desarrolladas en la Misna y el Talmud.

Miqvaot principales. En Oriente, las excavaciones arqueológicas realizadas en Israel están sacando a la luz edificios de este tipo, cuyos restos más antiguos podemos fecharlos en la época del Segundo Templo. Restos de edificios los tenemos en Jericó, Jerusalén, Herodium, Gezer, Khirbet, Susiya, Korazim, Maon, Gamla y Horvat Hazan.

En Europa, la más antigua es la de Andernach. Las de Offenburg, Speyer, Frieberg, Worms, Spira, Heidelberg, Colonia, Pretzfeld y Hannoversch en Alemania; la de Lieja en Bélgica; Soprou en Hungría; Carpentras, Chalon sur Saóne, Haguenau, Marseille, Montpellier, Narbonne, Nîmes, Peronne, Strasbourg y Rouen en Francia.

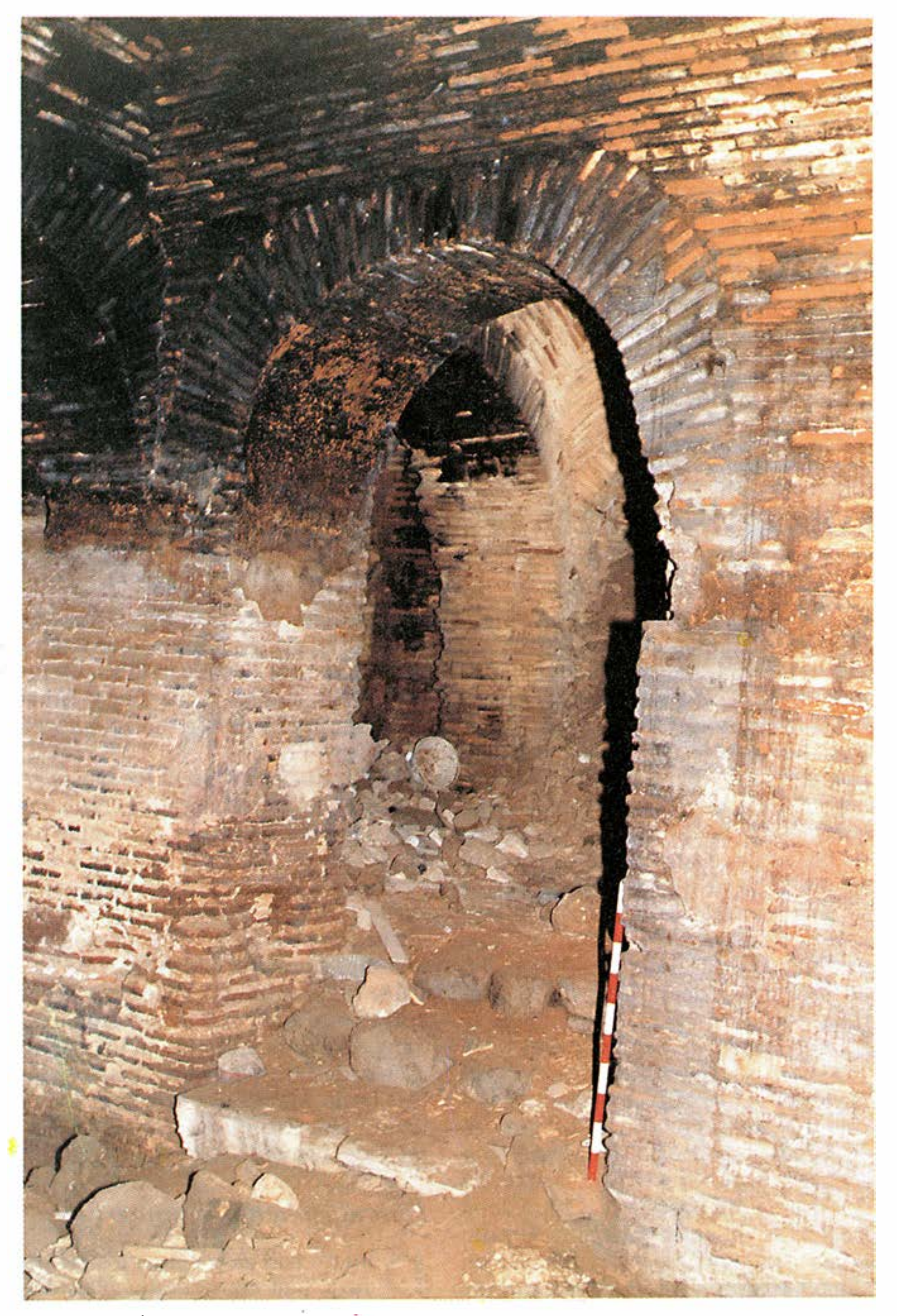
Poco sabemos de los baños rituales de España, lo que está justificado porque se han realizado pocas excavaciones sistemáticas en zonas pobladas de judíos, y cuando éstas se han hecho han tenido objetivos concretos, verbigracia, excavar los cementerios de Segovia, Montjuich de Barcelona, Puente de Castro en León, etc. Por otra parte, a veces, y dado el desconocimiento de las peculiaridades de estos baños, se han dado por árabes lo que posiblemente por su contextura sean baños rituales judíos. Es el momento en que los conservadores de este Museo y por una excavación

de urgencia motivada por las obras que se venían realizando en el mismo fueron a dar con una parte de estos baños en el recinto de la Sinagoga de Tránsito.

Los restos materiales de estas *miqvaot* no son muy abundantes, pero sí podemos hablar de la de Besalú en Gerona, que según nos la describe Concha Munuera Bassols "es una pequeña sala rectangular (4,5 por 5,5 m) construida con piedra de sillería y cubierta por una magnífica bóveda de cañón de más de un metro de espesor. Desde la puerta de entrada situada en el muro Norte, bajan unos escalones que se continúan con un rellano y desde él, ya en el lado Oeste de la habitación, se puede bajar a la piscina que ocupa la mayor parte del local. A lo largo de la pared Sur, que da al río, corre otro rellano algo más estrecho que el de enfrente, y al final, empotrado en el muro Este, hay una especie de nicho de utilidad desconocida. La iluminación está asegurada por una ventana alargada, con alféizar en derrame, abierta en medio de la pared del lado Este, y dos orificios en forma de troneras, uno a cada lado de la ventana, servirían seguramente para ventilar la habitación".

Tenemos otro *miqvé* en Ribadavia, Orense, sobre el que hoy se ha construido un bar, descrito por José Ramón Esteve: "está situado dentro de la misma sinagoga, en una habitación muy íntima de tres metros de ancho y cinco a lo largo; divide la habitación una bella arcada, y sus paredes son muy gruesas, con un contrafuerte rematado en un caño hacia el centro de la habitación. Tanto el contrafuerte como la pared son muy parecidos a los contrafuertes que sujetan las paredes laterales y exteriores de las iglesias románicas de Santiago y San Juan. La pequeña piscina se encuentra cubierta con una capa de dos metros de tierra. Podemos afirmar que es uno de los pocos baños que se conocen en España".

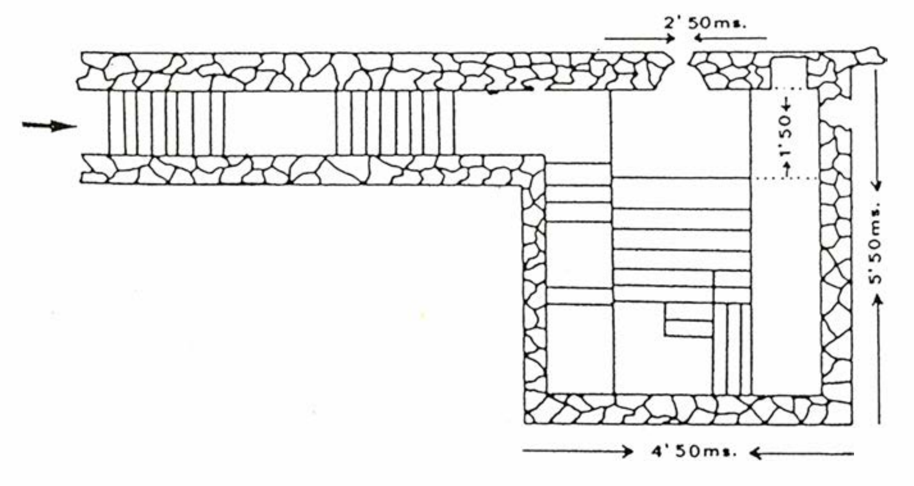
Por lo que se refiere a nuestro baño, en el recinto de la Sinagoga del Tránsito, el descubrimiento llevado a cabo se realizó como consecuencia del estudio de unos restos arqueológicos aparecidos en la excavación del patio Este de la misma. El descubrimiento de unas habitaciones abovedadas, y una serie de pozos para la recogida de agua, nos llevó a plantearnos su uso como "baño ritual", aunque faltaban algunos elementos tan característicos como las piscinas, que definen muy bien este tipo de edificios, documentados desde época antigua en el Próximo Oriente.



1. MIQVÉ en las dependencias de la Casa del Greco. "La madre del novio entrega la novia completamente desnuda a la bañera, *o mujer encargada de asistirla, la cual entra con aquélla en el baño y cuida de que el agua la cubra por completo, de que no roce su cuerpo con los muros de la piscina y de rezar las oraciones de la purificación... Es la madre del novio quien viste la camisa a la novia, y las demás mujeres de la familia del desposado las demás prendas, que han de ser blancas para que la vida que va a comenzar sea clara y alegre." (Arcadio de Larrea Palacín en:* Cancionero judío del norte de Marruecos: *Canciones rituales hispano-judías. Madrid, C.S.I.C., 1954, pp. 16 y 17.) (Fotografía San José.)*

Un estudio documental al respecto nos llevó a ampliar nuestra información y a plantearnos la posibilidad de que hubiese dos baños rituales (quizás uno público y otro privado), ambos en las proximidades de la Sinagoga y de cronología similar a ella, del siglo XIV. Este encontrado por nosotros sería el baño público.

Asimismo, el otro baño ritual se encuentra bajo los sótanos de la actual Casa del Greco y que en breve empezaremos a estudiar; es posible que, como la citada Casa se asienta



2. *PLANTA DE LA* MIQVÉ *de Besalú (tomado de Juan G. Atienza en* Guía Judía de España*).*

donde se encontraba ubicado el palacio de Samuel Leví, tesorero del rey Pedro I de Castilla, fuera, en una primera época, cabe suponerlo, el baño ritual privado del citado personaje. Más tarde, al caer en desgracia del rey, el uso del baño debió ser comunal. Así en un proceso inquisitorial contra judaizantes, de 1523, una testigo se refiere al uso del mismo por su señora "que vido en el dicho tienpo (a su ama) un día antes del ayuno mayor, yr al vanno de las judias, que eran cabo las casas del marques" (alude al Marqués de Villena, quien también vivió en el mismo lugar donde se situaba la casa de Samuel Leví).

Tenemos también noticias documentales sobre el baño ritual de Lérida, recogidas por David Romano en el Archivo del Real Patrimonio conservado en el Archivo de la Corona de Aragón, de Barcelona. "Item dona licencia lo dit en Bonant s. n Abrafin Abnacaya, juheu de Leyda, que en son alberch, lo cual ha en la ciutat de Leyda, puxxe fer bany d'aygua freda a banyar les juhies..." Dice el profesor Romano: "Parece evidente que nos hallamos ante un permiso para construir un baño y me atrevo a creer que puede tratarse de un *miqvé* por dos razones: primera, porque se especifica que es para las "judías", es decir, las mujeres (en caso de que hubiera sido para uno y otro sexo supongo que se habría escrito simplemente "juheus"); segunda, porque el verbo *banyar* tiene en el catalán medieval el sentido de "sumergirse" más que de "bañarse".

Asimismo podemos mencionar que los llamados baños árabes de Chinchilla de Montearagón (Albacete) incluyen una piscina de sospechosa forma que nos inducen a pensar que nos encontramos ante otro baño ritual judío. Su forma de doble cámara abovedada guarda cierto parecido con los restos del complejo de baño ritual que hemos encontrado en la Sinagoga del Tránsito.

Por lo que se refiere a los baños rituales en el mundo sefardí, tenemos más noticias sobre las comunidades del Norte de Africa (Fez) que sobre el resto de las comunidades. Sin embargo, dada la importancia de esta institución, es de suponer que nuevos nombres se sumen a los ya conocidos.

De todas formas, el tiempo y el conocimiento más exacto del ritual judío y de los yacimientos en los que se asentaron sacarán a la luz nuevos restos. (Ana M.ª López Alvarez y Santiago Palomero Plaza, del Museo Sefardí de Toledo.)

Descubrimiento cósmico

Durante casi dos siglos, los científicos han considerado plausible la hipótesis según la cual el sistema solar se formó a partir de la acumulación de gas y polvo cósmico en rotación que rodeaba al sol durante sus primeros estadios de vida. Observaciones actuales de unos objetos celestes denominados estrellas T-Tauri proporcionan las primeras pruebas de que los planetas se crean en nubes alrededor de las estrellas recientes y que el proceso de formación planetaria podría durar unos 300.000 años, un abrir y cerrar de ojos comparado con los patrones cósmicos.

Se cree que las estrellas T- Tauri, conocidas por este nombre después de que se descubriera un prototipo en la constelación de Tauro, representan los primeros estadios en la formación de estrellas de tipo solar. Muchas emiten radiación de luz infrarroja, lo que induce a pensar que están rodeadas de nubes de polvo que absorben la luz visible y, a consecuencia de ello, se calientan y reemiten la luz en forma de radiación infrarroja. Las variaciones de su brillo son erráticas, como si se oscurecieran de manera intermitente. Estos y otros fenómenos son los que dan indicios para pensar que las estrellas están rodeadas de discos de polvo y gas en rotación. Los astrónomos consideraban desde hace tiempo que estos discos eran, probablemente, una fuente de materia para la formación de planetas, pero hasta ahora carecíamos de razones sólidas que lo confirmaran.

Karen M. Strom y cuatro colegas suyos de la Universidad de Massachusetts en Amherst, se dedicaron a estudiar la evolución de los discos. Observaron 83 estrellas T- Tauri y calcularon sus edades respectivas, basándose en su luminosidad y temperatura. Han publicado sus hallazgos en *Astronomical Journal*. Un 60 por ciento de las estrellas de edad inferior a tres millones de años parecen estar rodeadas de estos discos, mientras que sólo un 10 por ciento de las mayores de 10 millones de años tienen también esta característica.

El grupo de Strom ve indicios de que la desaparición de los discos en las estrellas más antiguas está ligada a la aparición de planetas. Algunas estrellas T- Tauri muestran importantes emisiones de onda larga de radiación infrarroja, característica de los objetos fríos, pero no de longitudes de onda más cortas, radiación emitida por los cuerpos más calientes. Imaginan, por tanto, que estas estrellas podrían hallarse rodeadas de discos, toroidales y aplanados, donde las zonas más calientes en su interior están relativamente vacías, mientras que las zonas exteriores más frías permanecen intactas.

Strom sospecha que los planetas o los asteroides que se forman cerca de la estrella arrastran consigo, en su órbita, el polvo de los alrededores. El hecho de que sólo se pierdan las partes más internas de los discos parece indicar que empiezan por formarse los planetas cercanos a la estrella para crearse luego los de zonas más frías y externas de los discos. Los planetas, con mucho, son menos eficientes que el polvo en la emisión de radiación infrarroja, razón por la cual escapan a la visión directa; el único signo que da fe de su existencia es la desaparición de las emisiones infrarrojas del polvo caliente.

En el trabajo de Strom, una décima

parte de las 83 estrellas T-Tauri muestra las peculiaridades infrarrojas que se consideran características de "agujeros internos". Si esta observación incluye un muestreo al azar de estrellas jóvenes, entonces los discos en evolución (los que están en proceso de vaciado) deben invertir una décima parte de la edad de la estrella. La media de edades es de unos tres millones de años, lo que significa que este proceso puede durar unos 300.000 años. Si la formación de planetas es la causa del vaciado de los discos, deberá realizarse el proceso en ese, increíblemente corto, período de tiempo, condición que representa una importante restricción para las teorías que describen el origen del sistema solar.

Strom y otros investigadores se proponen observar estrellas T-Tauri en muchos valores de la longitud de onda infrarroja, a fin de determinar con certeza la realidad de los agujeros interiores de los discos de T-Tauri. Si sus resultados se confirman, esperan encontrar discos que representen una serie de estadios evolutivos y reconstruyan, en su integridad, el proceso de vaciado. Strom confía en que el telescopio espacial Hubble, cuyo lanzamiento está programado para este año, será capaz de detectar los casi imperceptibles restos más externos de algunos discos de estrellas T-Tauri desnudas, para mostrar que alguna vez estas estrellas tuvieron discos que se desvanecieron, quizá por la formación de sistemas planetarios como el nuestro.

La prueba del elefante

La técnica de las "huellas dactilares" del ADN –que se basa en la búsqueda de una similitud genética entre un ADN problema y el ADN de la sangre, piel o algún otro material celular de referencia– ha contribuido ya a resolver investigaciones criminales de homicidios. ¿Podrá también detener la masacre de elefantes en Africa?

Los cazadores furtivos en busca de marfil son los principales responsables de la disminución vertiginosa de elefantes en Africa: durante la última década, la población, cifrada en 300.000 individuos, ha caído por debajo de la mitad. Kenia, Tanzania y otros países que padecen la caza furtiva han convencido a la mayoría de los estados integrados en la Convención Internacional de Comercio de Especies en Peligro (CICES), para que prohíban totalmente el comercio de marfil.

Pero ni Botswana ni Zimbabwe se atienen a esa prohibición. Debido a la persecución de los furtivos, las manadas de elefantes están allí creciendo y han de controlarse para evitar la superpoblación. Lo paradójico del caso es que los gobiernos de Botswana y Zimbabwe, países miembros también de dicho organismo internacional, sostienen que su labor proteccionista depende de las ganancias obtenidas con la venta de carne, piel y pelo de elefante, además de su marfil.

Sabido es que todo mercado legal abre un portillo a la creación de un mercado negro. Los traficantes sólo necesitan introducir marfil ilegal de contrabando en un país que permita su comercio o falsificar los documentos asignando al producto un origen legal. Algunos partidarios de la protección opinan que la técnica de identificación por huellas de ADN podría erradicar estas formas de contrabando.

John C. Patton, de la Universidad de Washington, ha investigado la capacidad potencial de esta técnica. Ha analizado la sangre de dos elefantes de Zimbabwe que se encuentran ahora en parques zoológicos, y tejidos de otro centenar sacrificados por los cazadores furtivos en Kenia y Tanzania. (El marfil es un material acelular, como el esmalte dentario, y, por tanto, no sirve para un análisis del ácido desoxirribonucleico.) Según John C. Patton, sus resultados sugieren, por el momento, que los elefantes de distintas regiones de Africa presentan perfiles genéticos distintos; sin embargo, antes de confirmar el modelo necesita analizar una población más amplia.

Western señala que, para establecer la técnica de "huellas" de ADN como prueba de identificación de origen, se requiere la cooperación de los países que continúan comerciando con marfil. Ha pedido a los gobiernos de estos países que le faciliten sangre o muestras de tejido de sus manadas de elefantes, para poder elaborar una base de datos genéticos y ha solicitado también que se exija que los colmillos puestos a la venta lleven tejido suficiente para un análisis de los ácidos nucleicos.

El proyecto tiene aplicaciones forenses y científicas al mismo tiempo. Posibilitará que los expertos establezcan la relación genética entre los elefantes africanos que habitan los espacios abiertos de la sabana y los que prefieren las frondosas selvas de las montañas. Y podría también ayudar a los directores de zoológicos y reservas a asegurar que las parejas de elefantes en celo sean genéticamente compatibles.





3. ELEFANTES de la Reserva Nacional Samburu de Kenia. Huyen ante la presencia del hombre y se esconden detrás de los matorrales. Este comportamiento temeroso sugiere que las manadas han sido en anteriores ocasiones atacadas por los cazadores furtivos. (Fotografía de Suzie Gilbert.)

Ciencia y empresa

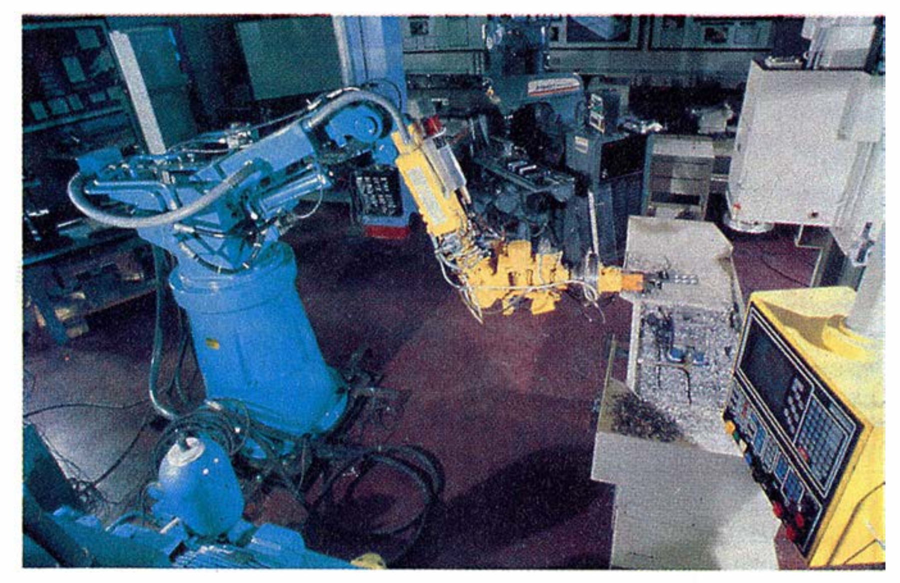
Inteligencia y empresa

A principios del decenio de 1980, los sistemas expertos iban pisando los talones a las máquinas-herramientas controladas por ordenador, a la robótica y a la planificación de los métodos de producción. Se confiaba en ellos para crear la "fábrica ideal". Unos programas de ordenador ultracomplicados, dotados de inteligencia artificial y basados en reglas y deducciones lógicas, servirían para guiar a dóciles robots, analizarían instantámeamente las averías de las máquinas y saldrían al paso de cualquier desajuste entre componentes. Las empresas adaptarían las naves de producción a las exigencias de la demanda y presentarían la versatilidad necesaria para fabricar nuevos artículos.

La realidad, empero, ha sido muy otra. La implantación de la inteligencia artificial (IA) en las fábricas ha alcanzado niveles "discretos", reconoce Mark S. Fox, director del laboratorio de robótica de la Universidad Carnegie-Mellon. Aunque el número de proyectos comerciales en desarrollo ha aumentado, desde medio millar en todo el mundo, en 1985, hasta varios miles hoy en día, se trata de una fracción pequeña de las aplicaciones potenciales.

La mitad del dinero gastado hasta ahora en IA sólo ha rendido "carísimas comunicaciones a congresos", confesaba Karl Kempf, de la empresa Intel, en la 11ª Conferencia Internacional Conjunta sobre Inteligencia Artificial, celebrada el último agosto. Algunos programas de IA han ocupado los titulares de los periódicos, pero casi toda la inteligencia que corre por las naves fabriles continúa residiendo en las cabezas de los trabajadores e ingenieros. ¿Qué explicación dar?

Fox culpa a los directivos, en quienes ve un obstáculo: mientras no entiendan en qué consiste la IA, las fábricas inteligentes arrastrarán una vida mortecina. Para E. J. van de Kraats, de Shell Research, la IA debe limitarse a competir por llevarse el dinero de las inversiones hacia otras técnicas: cálculo de alta velocidad, análisis matemático y ciencia de materiales. La lenta adopción de la IA no supone ningún fracaso, sino un voto de confianza en favor de algo distinto, insiste van de Kraats. Kempf está de acuerdo: los directivos de las empresas son gente "ocupada, pero no estúpida". En la fabricación se tiende a ser conservador, pues a esa gente "ya la han enredado antes". La inteligencia artificial debe demostrar su valor real si quiere gozar de plena aceptación.



1. LOS ROBOTS QUE TRABAJAN EN LINEAS DE MONTAJE pasaron antes por el centro de la investigación de la inteligencia artificial; ahora, el control de los robots para labores sencillas se hace mediante programas informáticos convencionales, mientras que las tareas complicadas quedan todavía fuera de las posibilidades de la mayoría de los sistemas expertos. Los investigadores en inteligencia artificial se centran en la programación del flujo de componentes en una fábrica y otras tareas de dirección, La fotografía es cortesía de la Universidad Carnegie-Mellon.

Paradójicamente, gran parte del éxito obtenido por la IA en los procesos de fabricación se ha producido fuera de las naves industriales. Frank S. Lynch, de Digital Equipment Corporation, señala que los investigadores de Digital que trabajan en el desarrollo de sistemas para uso doméstico muestran buen cuidado en no tratar de aplicar la IA a la fabricación y montaje de ordenadores. Prefieren aprovechar esa técnica para agilizar la parte burocrática y reducir, todo lo posible, el trabajo indirecto que reclama la venta, producción y entrega de cada máquina.

Digital logró su primer éxito en IA hace diez años con XCON, un programa que usaba las reglas de inferencia de la lógica para configurar la instalación de sus ordenadores VAX; es decir, para asegurarse de que cada pedido llevaba los cables apropiados, fuentes de alimentación y otros equipos, y que los armarios metálicos poseían la capacidad requerida para contener todos los componentes. Desde entonces, el XCON se ha ampliado para abarcar un margen mayor de productos Digital relacionados con los ordenadores, y se han agregado otros programas para aconsejar a los vendedores y los clientes y para mantener en contacto la producción y la mercadotecnia. La compañía estima que gasta menos de 30 millones de dólares al año en IA y ahorra, sin embargo, unos 140 millones anuales.

De hecho, los programas actuales de IA —sistemas expertos, sistemas basados en conocimiento y demás— parecen dar los mejores resultados cuando se les aleja de la tarea real de estampar, cortar o forjar metales, o bien de manejar componentes directamente. Cifrar información del mundo real (el sonido de un torno que trabaja el metal o la posición del brazo de un robot, milisegundo a milisegundo) en forma compacta y legible por una máquina es difícil. Los programas expertos se desenvuelven mejor con información simbólica (calendarios

de producción o signos de una avería en una máquina).

Una de tales tareas es la distribución del trabajo a pie de fábrica: establecer el ritmo de operación de cada máquina, para conseguir acortar el tiempo requerido en la fabricación del producto y abreviar asimismo los tiempos muertos de la maquinaria. La programación ha constituido un éxito, notable y manifiesto, de la IA aplicada a la fabricación, explica Fox, desde el momento en que uno de los primeros programas de fabricación duplicó el rendimiento de una planta de circuitos impresos, a partir del día mismo en que se puso en marcha.

Tales avances no se consiguen gratis. Cuando la compañía General Electric instaló uno de los primeros sistemas de programación en una fábrica de motores a reacción, tuvo que empezar por remodelarla. Instaló una red de comunicaciones construida con el fin de que el programa de movimientos y tiempos pudiera determinar las condiciones de las máquinas que había de regular.

Kempf distingue tres clases de aplicaciones potenciales de la IA. En primer lugar, mediante programas de relativa sencillez, se puede cifrar el acervo de conocimientos necesarios para tareas que requieren razonar y que las personas realizan ya bien, verbigracia, identificar y reparar averías en equipos simples. Estos programas ayudan a los trabajadores nuevos a actuar casi al nivel de los expertos y libera a éstos de la tareas rutinarias. Los programas de IA resultan también inapreciables en trabajos que la gente, si bien comprende con facilidad, se muestra torpe a la hora de su resolución (pensemos en la programación de trabajos) por causa del volumen de información que llevan consigo o la velocidad a la cual ésta llega. Los programas inteligentes para una tercera clase de problemas —los que los humanos no sabemos cómo resolver— fracasarán casi con seguridad, pronostica Kempf. Los creadores de IA deberían evitar, a toda costa, los problemas de esta categoría (a la que pertenece la fabricación integral mediante ordenador), añade.

No obstante, la creación de un algoritmo de inteligencia artificial constituye sólo aproximadamente una cuarta parte del esfuerzo necesario para construir un sistema que funcione. Las partes del mismo ajenas a la IA dan más trabajo del que nadie se imagina, dice Kempf: analizar a fondo la tarea a realizar y construir, entonces, un sistema que las personas corrientes puedan usar y mejorar.

Van de Kraats recuerda un sistema inteligente para ingeniería de bolsas de petróleo que Shell introdujo a bombo y platillo, para dejarlo arrinconado antes de un año. Se trataba del problema siguiente: el programa consideraba las cuestiones de perforación y extracción que los expertos de la compañía juzgaban prioritarias, pero no tenía en cuenta dificultades comunes que se plantean en todo trabajo de campo.

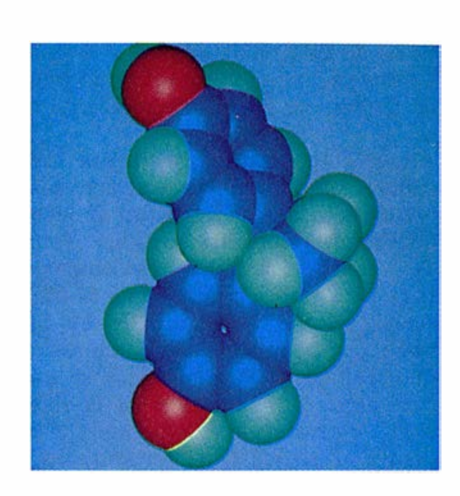
Los creadores de sistemas de inteligencia artificial deberían, según Kempf, poner mayor énfasis en la selección y análisis de sus tareas. "La gente de IA quiere hacer la parte divertida y luego largarse", comenta. "Y eso no dará resultado."

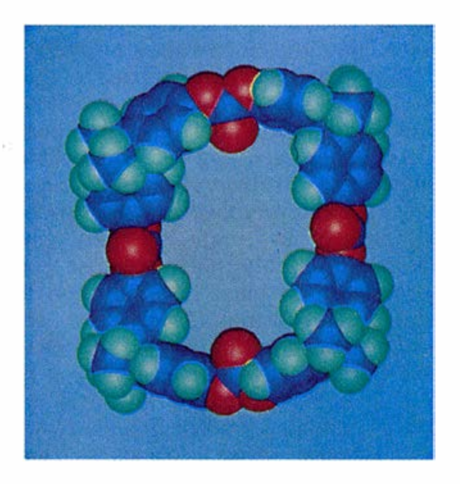
Lynch, que comparte ese criterio, añade que la inteligencia artificial es sólo una herramienta para automatizar los procesos de fabricación. Hoy día, los sistemas de IA suelen estar proyectados para sumergirse en las bases de datos de las empresas, en busca de la información que éstas necesitan, y entregarla entonces a los programas informáticos convencionales. (Este proceso puede ser difícil; Kempf se refiere a un proyecto de IA para fabricación flexible que hubo de abandonarse porque los especialistas hubieran tardado dos años en crear los programas para extraer los datos de los ordenadores corrientes.)

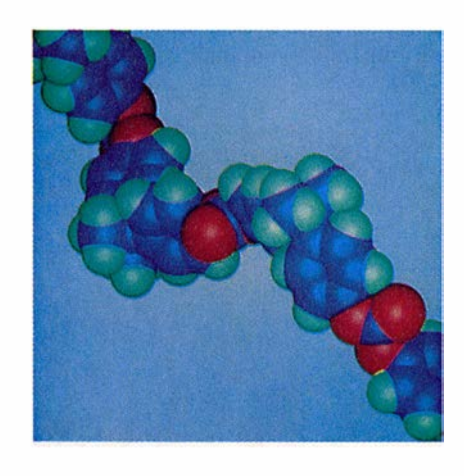
La evolución de la IA, desde que se la reputó nueva panacea universal de la industria hasta que terminó por convertirse en herramienta diaria, se ha reflejado en las vicisitudes de las compañías de venta de inteligencia artificial, apostilla Fox. Hubo una época en que el mercado estaba saturado de firmas que vendían herramientas para elaborar sistemas expertos; hoy sobreviven sólo un número exiguo de ellas. Las firmas consultoras y de ingeniería florecen ahora adaptando programas para tareas específicos. "El verdadero problema", dice Fox, "es resolver problemas".

De los plásticos a los nuevos materiales

Los materiales compuestos ("composites") constan de fuertes fibras inmersas en una matriz cohesiva. Aunque ligeros y resistentes, presentan un inconveniente: cuesta muchísimo darles forma. Los investigadores de la empresa General Electric acaban de desarrollar, sin embargo, una técnica que permite convertir ciertas resinas plásticas que son viscosas a altas temperaturas en líquidos que fluyen con la misma facilidad que los aceites lubricantes. El resultado es un plástico que penetra entre los inters-







2. *ANILLO MOLECULAR* (centro)*; constituye el componente básico de una forma nueva y más manejable de policarbonato. Los anillos, formados a partir del monómero de policarbonato* (arriba)*, reducen la viscosidad del plástico y dejan que la resina penetre entre las fibras de refuerzo de un material compuesto. Los anillos se abren después y se encadenan entre sí, formando las cadenas del polímero* (abajo)*, que confieren al plástico su resistencia. Las ilustraciones son cortesía de la empresa General Electric.*

ticios de una malla fibrosa y origina un material compuesto al que se puede fácilmente dar forma mediante el calor.

Los compuestos constituyen frecuentemente alternativas atractivas a materiales más pesados en muchas aplicaciones industriales, dice John W. Verbicky, directivo del Centro de Investigación y Desarrollo de la GE. Antes del trabajo de la GE, los fabricantes de materiales compuestos que trabajaban con plásticos se encontraban muy limitados en la elección del material aglomerante. Podían usar un plástico "termofijado", tal como la epoxina, para humedecer las fibras; pero, una vez la resina se había endurecido, el compuesto no se podía moldear ni volver a fundir.

Los termoplásticos ordinarios, que se hacen maleables cuando se calientan, son demasiado viscosos para combinarse bien con las fibras. Para superar ese problema, se diluye fuertemente el termoplástico y se evapora después el disolvente. Se trata, empero, de una alternativa costosa que solamente da buen resultado con la mitad de los termoplásticos.

La técnica encaminada a domeñar los termoplásticos debe ayudar a la GE a hallar mercados más amplios para sus resinas y productos plásticos. Por ejemplo, según informes, la compañía produce cada año más de 100 millones de kilos de virutas de policarbonato, un termoplástico duro que se emplea en ventanas, aparatos electrónicos y equipos deportivos. De ese modo, cuando Daniel J. Brunelle, químico orgánico del centro de Investigación y Desarrollo de la compañía General Electric, visitó a sus colegas de la filial de la empresa en Mount Vernon, Indiana, recibió un encargo: crear un policarbonato que fluyera fácilmente cuando se fundía, de modo que se pudiera incorporar a los materiales compuestos.

La viscosidad de un material refleja su estructura molecular. Los policarbonatos están formados por unidades moleculares (monómeros), unidas entre sí en largas cadenas (polímeros). Los polímeros pesados confieren al material sus cualidades deseables —resistencia y duración— aunque pueden también fácilmente enredarse y volver viscosa la resina. Para que el material fluyera, Brunelle sabía que sólo necesitaba transformar los monómeros en anillos, que se deslizarían fácilmente entre sí. En unos cuatro meses, había identificado una reacción que transformaba alrededor del 70 por ciento de una pequeña muestra de policarbonato en anillos moleculares.

En el pasado, los científicos habían hallado maneras de producir anillos de esta clase con 20 o 30 miembros o átomos, dice Verbicky. Pero esos anillos pequeños son sólo factibles en plásticos que tienen monómeros flexibles, que se doblan sin dificultad. Los policarbonatos, por el contrario, tienen monómeros rígidos e inflexibles. En consecuencia, deduce Verbicky, "pretendían obtener de 24 a 240 miembros por anillo en alta concentración".

Brunelle recuerda que la producción de anillos no era más que el principio. Para ser útil, el plástico final tenía que ofrecer las mismas propiedades que el policarbonato corriente. Pero "los anillos no se convierten espontáneamente en polímeros", observa Thomas L. Evans, químico de polímeros que trabajó en el proyecto. Los investigadores necesitaban una segunda reacción que indujera a formar largas cadenas. El material podría tornarse entonces viscoso y, con el tiempo, endurecerse.

A lo largo de los últimos años, los investigadores de GE han desarrollado muchos catalizadores para regular la velocidad y el momento de la polimerización. Según Evans, se han hallado catalizadores que convierten alrededor del 99 por ciento de los anillos moleculares en polímeros, en tiempos que varían entre 30 segundos y media hora. Ello no obstante, los investigadores de la GE conceden que trabajar con grandes cantidades de material es todavía difícil.

La química de formación de ciclos da buen resultado con ciertos plásticos, expone Verbicky. Los investigadores han aplicado la técnica con éxito a una docena de materiales distintos de los policarbonatos. Todos son "polímeros de condensación", que pierden moléculas ligeras, el agua por ejemplo, cuando se forman.

Aunque la GE presentó oficialmente su técnica de plásticos vertibles en una reunión de la American Chemical Society a principios de septiembre, Verbicky subraya que aún no está lista para pasar a la producción. La GE tiene todavía que desarrollar su estrategia de comercialización. "Considerando que pertenece al ámbito de la investigación y el desarrollo, es normal esa falta de estrategia comercial", apunta. "Todo el mundo tiene ideas sobre dónde deberíamos ir, pero todavía falta recorrer un largo camino" para poner a punto el proceso de fabricación.

3. BALANCE POR CUENTA CORRIENTE, en el que se muestra que los EE.UU. han experimentado un déficit comercial global (negro) *desde 1982, aun cuando el comercio de mercancías* (azul) *se presentara deficitario desde 1976. (El balance por cuenta corriente es la suma de las importaciones más exportaciones, junto con "intercambios unilaterales".) El sector de servicios de la cuenta* (rojo) *presentó déficit por primera vez en el segundo trimestre de 1989. Fuente:* Survey of Current Business, *de la Oficina de Análisis Económico.*

Desequilibrio de la balanza de pagos

"El país que carezca de capital suficiente para esos tres objetivos (comercio, agricultura e industria) no ha llegado al grado de opulencia para el que parece naturalmente destinado."

ADAM SMITH,
La riqueza de las naciones

Si Adam Smith echara un vistazo a la balanza de pagos de los EE.UU. (la diferencia entre las importaciones y las exportaciones del país) movería la cabeza en signo de desaprobación. En 1988, continuando un curso que comenzó en los inicios de esa década, importaron mercancías por 112.000 millones de dólares más de lo que exportaron. El tradicionalmente robusto sector de servicios de la balanza comercial acabó también con déficit. Pese a ello, muy pocos norteamericanos dudan de que los EE.UU. se encuentren entre los países más ricos.

Las economías nacionales se han hecho endiabladamente complicadas desde que Smith publicó *Investigación sobre la naturaleza y las causas de la riqueza de las naciones* en 1776. Aunque Smith podría haber condenado sin ambages las cuentas deficitarias, los economistas de hoy discrepan sobre si el déficit de la balanza de pagos de los EE.UU. es o no causa de preocupación. "No me atemorizan esas cifras [del déficit comercial]", opina Robert Eisner, economista de la Universidad del Noroeste. A otros sí les preocupa que los déficits, financiados con entrada de capitales extranjeros, estén minando los fondos que podrían dedicarse a inversiones en investigación o manufactura.

Quizá la mejor medida del valor de las mercancías y servicios que atraviesan las fronteras de los EE.UU. resida en la "cuenta corriente", que la Oficina federal de Análisis Económico (BEA) calcula cada trimestre. La cuenta divide las transacciones en dos categorías: mercancías y servicios. El sector de las mercancías está compuesto por los productos agrícolas, automóviles, bienes de consumo, etc. El sector de los servicios sigue el curso del valor del pago de intereses y otras transacciones financieras, honorarios por servicios legales y técnicos, pago de regalías y gastos de viajes. (Hay algunas cosas que quedan a medio camino entre ambas categorías y, por tanto, no están completamente incluidas en las cuentas, según conceden los funcionarios de la BEA. Los programas de ordenador, por ejemplo, se clasifican como mercancías, de modo que los exportadores sólo deben informar sobre el valor del producto físico, por ejemplo, los 50 centavos que vale el diskette flexible. La BEA está tratando de revisar las normas de control para remediar estos fallos.)

Cuando el sector de mercancías de la cuenta corriente de los EE.UU. se precipitó en el déficit, en 1976, la causa estaba clara: la brutal subida de los precios del crudo importado. No obstante, pronto algunos fabricantes norteamericanos perdían negocio también. En 1982, la cuenta corriente se había sumergido, en bloque, en números rojos. El déficit superó los 140.000 millones en 1987, pero decreció algo en 1988.

Las causas del déficit en el sector de los servicios, registradas por primera vez en el segundo trimestre de 1989, son más sutiles. Este déficit, primero que la cuenta ha sufrido desde 1958, es minúsculo, sólo 176 millones de dólares. Dice poco acerca del estado de salud de la industria bancaria de los EE.UU.; en realidad, lo que significa es que la nación está pagando más intereses y dividendos a los extranjeros que poseen inversiones norteamericanas —desde acciones de empresas hasta bonos del tesoro— que los que sus propios inversores están ganando en el extranjero. En el segundo trimestre de 1989, esta diferencia fue de unos 5000 millones. (Los superávits en otras actividades, en especial el turismo, mantuvieron en niveles discretos el déficit neto del sector de los servicios.)

Hay división de opiniones entre los expertos acerca de la importancia de esos distintos apartados del déficit comercial. Como observó el *Informe Económico del Presidente* en enero de 1989: "En algunos casos, un déficit de cuenta corriente indica un problema inherente en la política económica o en las condiciones económicas subyacentes. En otros casos, un déficit de cuenta corriente refleja una economía sana y en crecimiento, en la que los ciudadanos están tomando prestado para invertir y consumir, anticipando un robusto futuro".

¿De cuál de los dos casos se trata? Entre los optimistas se encuentran los economistas que diseñaron la política económica de la Administración Reagan; así, Paul Craig Roberts, contratado hoy por el Centro de Estudios Estratégicos e Internacionales. "En un mundo de mercados internacionales de capital, si Vd. es deudor, ocupa una buena posición para la inversión", dice Roberts. La deuda, en consecuencia, es "una señal de su éxito", añade.

El argumento de Roberts se basa en su creencia de que la inversión directa en los EE.UU., —es decir, el dinero gastado en nuevas fábricas, investigación, etc.— ha aumentado con el desequilibrio de la balanza comercial de los EE.UU. El crecimiento en la inversión real bruta durante los últimos años "no ha tenido precedente", señala. Otros economistas discrepan de esta conclusión e indican que la inversión neta (la inversión bruta menos el valor de las antiguas instalaciones o equipos que están dejando de funcionar) ha disminuido.

En opinión de Eisner, aun cuando los EE.UU. mantuvieran un déficit de 150.000 millones de dólares durante cinco años consecutivos y pagasen un 4 por ciento de interés real por la deuda resultante, los pagos anuales de interés serían escasamente un 0,5 por ciento del producto nacional bruto de la nación. Defiende que se trata de una carga "ligera" para las futuras generaciones. Las políticas que pretenden frenar las compras de los EE.UU. para reducir el déficit comercial plantean una amenaza más grave, al arriesgarse a una recesión, dice. Hay que buscar, por contra, vías de incrementar la exportación, bajando los tipos de interés y permitiendo la caída del dólar.

Abaratar el dólar respecto a otras divisas debería animar a los países extranjeros a comprar más productos norteamericanos y enfriaría el entusiasmo de los EE.UU. por los importados, sigue Eisner. Además, unos tipos de interés más bajos espolearían a las empresas norteamericanas a invertir en casa (aunque las inversiones en el extranjero podrían disminuir). Eisner cree que el ahorro y la inversión doméstica, así como las ganancias en las exportaciones, deberían compensar las posibles pérdidas de inversiones en el extranjero.

Sin embargo, la Oficina de Presupuesto del Congreso de los EE.UU. (CBO) adopta un punto de vista más pesimista sobre el déficit por cuenta corriente. Un reciente informe de la CBO sobre la cuenta arguye que los préstamos del extranjero están principalmente alimentando el consumo, no la inversión. En efecto, dice Frederick Ribe, codirector del estudio de la CBO, el déficit por cuenta refleja una tendencia al gasto irresponsable por parte de los EE.UU., con la caída consiguiente del ahorro y la inversión interior. "Sería una gran cosa que pudiéramos aumentar el ahorro familiar", proclama. Y puesto que cambiar los hábitos de los individuos resulta tarea difícil, el gobierno debería proponerse reducir su propio gasto, añade.

El debate continúa. Las llamadas a incrementar el ahorro nacional son cada vez más apremiantes. Adam Smith las habría aplaudido: "Si la prodigalidad de algunos no fuera compensada por la frugalidad de otros, la conducta de cada pródigo, al alimentar a los ociosos con el pan de los industriosos, tendería no solamente a arruinarse a sí mismo, sino a empobrecer a su país".

Plexos coroideos de los mamíferos

Actúan como un "riñón" para el cerebro, bañando sus delicadas células en un fluido químicamente estable. Los plexos coroideos desempeñan una importante función en la alimentación y protección del sistema nervioso

Reynold Spector y Conrad E. Johanson

El cerebro se muestra exigente en lo que deja penetrar en sus tejidos. Debido a que sólo puede funcionar en un medio químicamente estable, el cerebro impide la entrada de la mayoría de las sustancias hidrosolubles que transporta la sangre, incluidos algunos medicamentos potencialmente beneficiosos. Tres estructuras actúan como celadores del interior del cerebro: la red de capilares cerebrales, la membrana aracnoides que recubre la superficie del cerebro y el tejido, difuso y profusamente vascularizado, que conocemos por plexos coroideos.

Los plexos coroideos y la membrana aracnoides actúan juntos como barreras entre la sangre y el líquido cefalorraquídeo (LCR), un caldo acuoso de nutrientes, iones y otras moléculas esenciales. El LCR baña el exterior del sistema nervioso central y llena los ventrículos (cuatro grandes cavidades del interior del cerebro). Debido a que el LCR intercambia libremente sustancias con el líquido intersticial que rodea a las neuronas y células gliales de soporte del cerebro, la barrera entre la sangre y el LCR resulta vital para mantener fuera del cerebro las sustancias peligrosas. La membrana aracnoides suele mostrarse impermeable a sustancias hidrosolubles; su papel en la formación de una barrera entre la sangre y el LCR es, en buena medida, pasivo. Los plexos coroideos, sin embargo, regulan de manera activa las concentraciones de moléculas en el LCR y determinan el carácter selectivo de la barrera sangre-LCR.

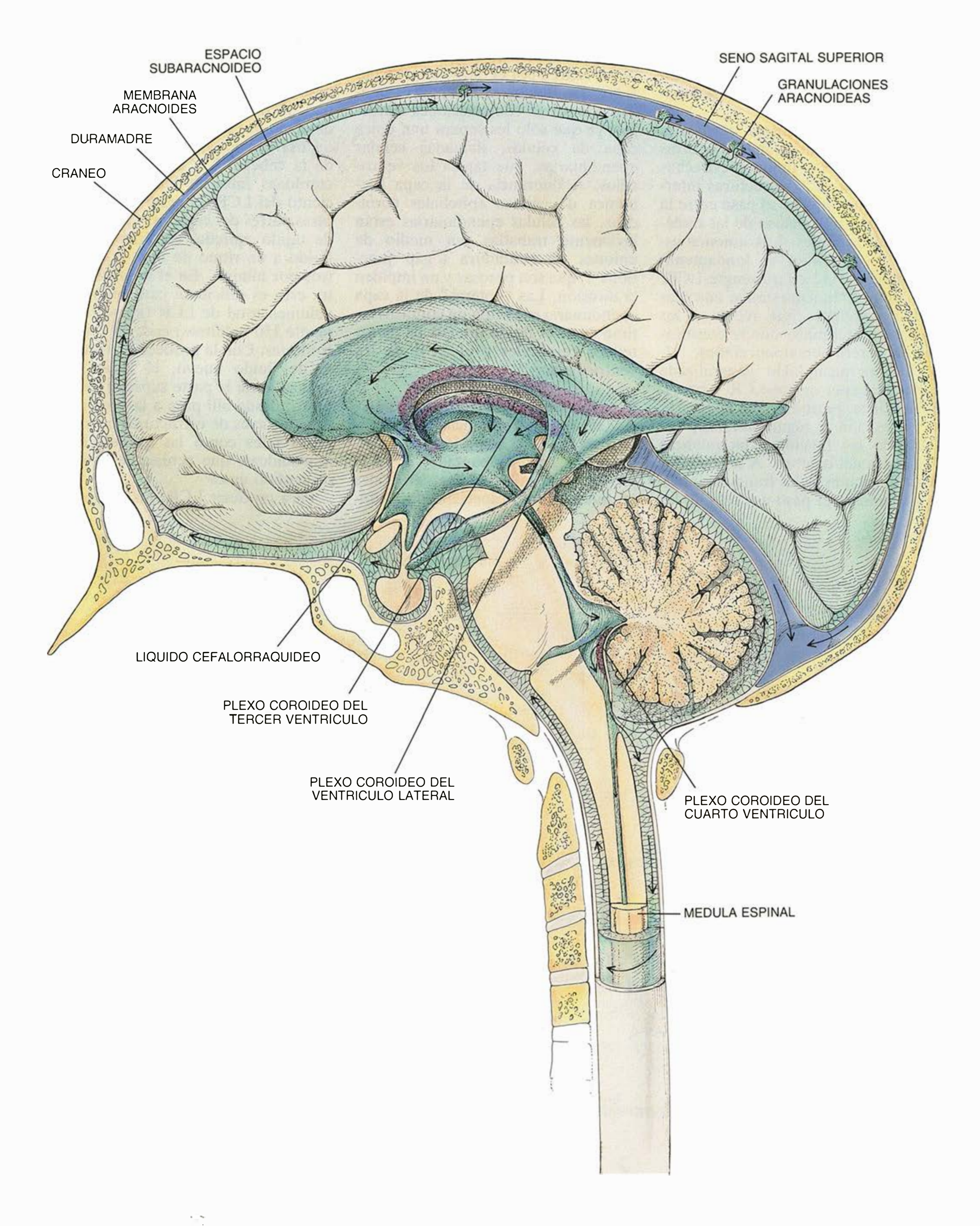
Los plexos coroideos vienen a ser, en efecto, el "riñón" del cerebro: mantienen la estabilidad química del LCR de modo muy similar al que emplean los riñones para mantener la estabilidad de la sangre. Pero no constituyen un mero órgano excretor. Fabrican también LCR, al que proveen de nutrientes extraídos de la sangre. El comportamiento de los plexos coroideos difiere notablemente de la conducta de los capilares cerebrales; éstos constituyen la barrera entre la sangre y el cerebro y median la difusión de sustancias desde la sangre directamente al fluido intersticial [véase "La barrera hematoencefálica", por Gary W. Goldstein y A. Lorris Betz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1986]. No obstante, el objetivo de los plexos coroideos y de los capilares cerebrales es el mismo: proporcionar al cerebro un ambiente estable y nutritivo.

Junto con nuestros colegas, hemos estudiado la fisiología de los plexos coroideos, incluidos los mecanismos de regulación que justifican el movimiento de sustancias a su través y las diferencias entre la barrera sangre-LCR y la barrera hematoencefálica. Conforme se vaya aclarando el funcionamiento de los plexos coroideos, se podrá avanzar en el tratamiento de las enfermedades del sistema nervioso central y de las infecciones del tejido cerebral, sin excluir el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA).

En los seres humanos y en otros mamíferos, los plexos coroideos están formados por varios penachos rojizos o rodales de tejido, muy pequeños. En su mayoría, los plexos coroideos se distribuyen de forma casi uniforme por el cuarto ventrículo, cerca de la base del cerebro, y por los ventrículos laterales de los hemisferios cerebrales derecho e izquierdo; alrededor de una décima parte de los plexos coroideos están situados en el tercer ventrículo de localización central. En la mayoría de mamíferos adultos, los plexos coroideos representan únicamente un 0,25 por ciento del peso total del cerebro; en los seres humanos, cuyos cerebros pesan poco más de un kilogramo, el peso de los plexos coroideos alcanza dos o tres gramos.

Vistos al microscopio óptico, los plexos coroideos tejen una red de formas densamente ramificadas. Cada fronda está constituida por capilares y otros pequeños vasos sanguíneos rodeados por una sola capa de células epiteliales. Al igual que las células epiteliales que recubren los intestinos y otros órganos, las de los plexos coroideos se encuentran estructuralmente polarizadas. Un lado de cada célula, la superficie basolateral, está en contacto con el plasma sanguíneo que "gotea" a través de las paredes de los capilares de los plexos coroideos. El lado opuesto de la célula, o super-

REYNOLD SPECTOR y CONRAD E. JOHANSON han hecho importantes aportaciones al estudio de los plexos coroideos y de la barrera sangre-LCR. Spector es director de ciencias clínicas en los laboratorios de investigación Merck Sharp & Dohme. Se licenció en medicina por la Universidad de Yale en 1966 y ha dedicado gran parte de su carrera al estudio de la regulación, por los plexos coroideos, de la concentración de varias moléculas dentro del sistema nervioso. Johanson, que se doctoró en fisiología por la facultad de medicina de la Universidad de Kansas, es profesor de neurología en la Universidad de Brown. Dirige también el laboratorio de investigación sobre el líquido cefalorraquídeo en el Hospital de Rhode Island en Providence, donde estudia las influencias neurohormonales sobre el transporte de iones en los plexos coroideos.



1. SE ASIENTAN LOS PLEXOS COROIDEOS en el interior de los ventrículos. Continuamente segregan líquido cefalorraquídeo (LCR), que protege el sistema nervioso, aportan nutrientes a los tejidos del cerebro y limpian a éste de sustancias de desecho. A medida que se produce LCR nuevo, el viejo se ve forzado a fluir (*flechas*) a través de los ventrículos, alrededor de la médula espinal y dentro del espacio subaracnoideo. El LCR intercambia sustancias con el fluido intersticial que rodea a las células del cerebro. Por fin, drena la sangre del seno sagital superior a través de las granulaciones aracnoideas. Por interponerse entre la sangre y el LCR, los plexos y la membrana aracnoides constituyen la barrera sangre-LCR.

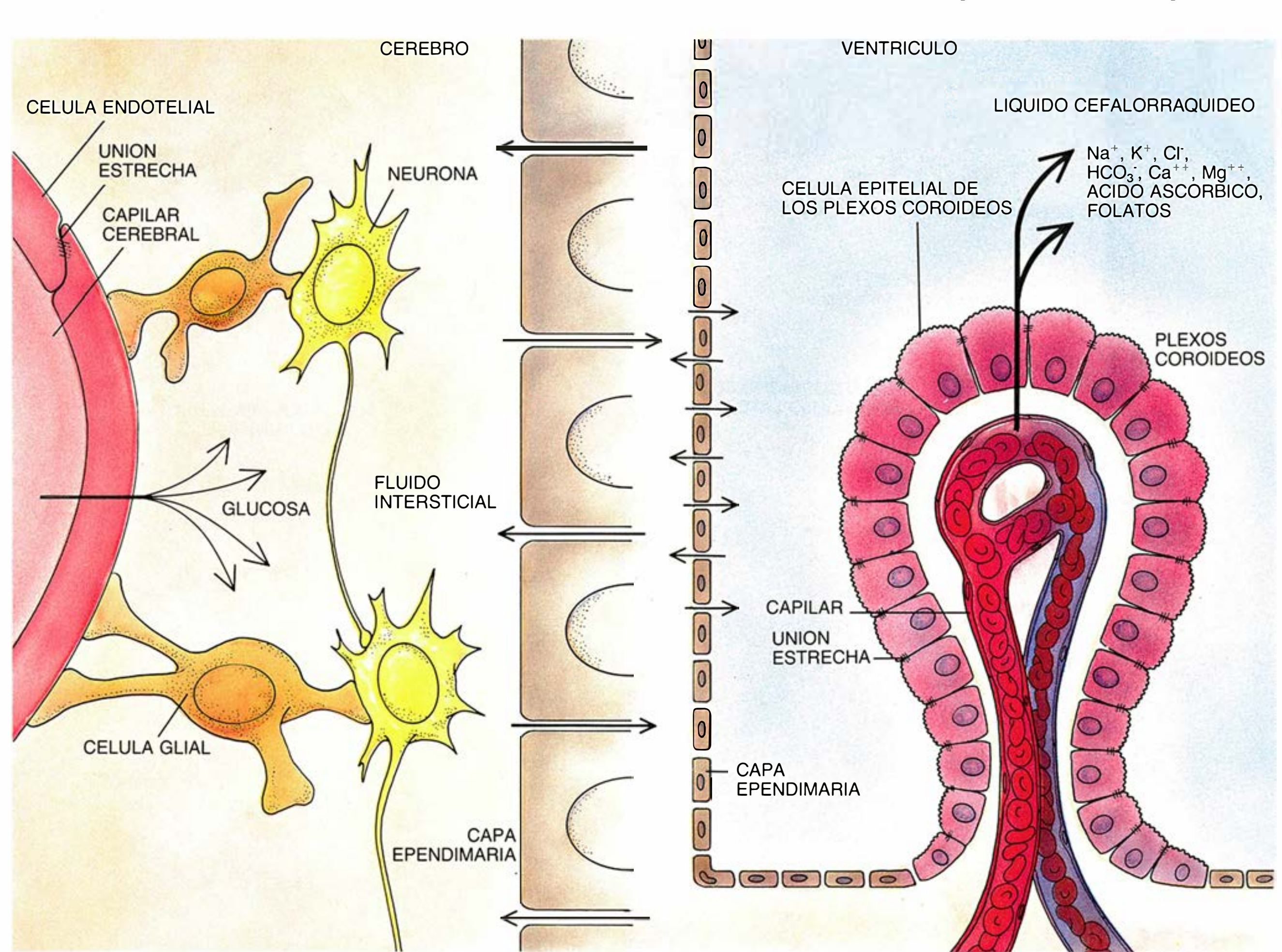
ficie apical, desarrolla microvellosidades, proyecciones microscópicas en forma de dedo, que se extienden hacia el LCR ventricular.

Las células epiteliales coroidales adyacentes se juntan unas con otras por medio de las uniones estrechas ("tight junctions"), estructuras intercelulares que impiden el paso entre la sangre y el LCR incluso de las moléculas hidrosolubles. Las uniones estrechas representan el fundamento anatómico de la barrera sangre-LCR. Cumplen una función similar entre las células epiteliales que recubren los capilares cerebrales, donde constituyen la barrera hematoencefálica.

La impermeabilidad generalizada de las barreras sangre-LCR y hematoencefálica permite una compartimentalización y regulación muy estricta de las funciones bioquímicas esenciales del cerebro. A algunos iones y nutrientes se les franquea intencionadamente el paso a través de las barreras, y se difunden lentamente por el LCR y por el fluido intersticial. Estos dos fluidos extracelulares tienden a mostrar composiciones similares, ya que sólo les separa una única capa de células, llamadas células ependimarias, que tapiza los ventrículos. A diferencia de la capa hermética de células epiteliales coroideas, las células ependimarias están laxamente trabadas por medio de uniones en hendidura ("gap junctions"), que son porosas y no impiden la difusión. Las "goteras" de la capa ependimaria permiten un contacto íntimo entre el fluido intersticial de los tejidos cerebrales y el LCR de los ventrículos.

Los plexos coroideos realizan diversas funciones esenciales. La más importante es la secreción del LCR. Como ya hemos apuntado, el LCR proporciona a las células cerebrales un medio fluido especializado y químicamente estable. También mantiene a flote el cerebro, reduciendo su peso efectivo 30 veces. Esta capacidad de flotación protege al cerebro del daño que irremisiblemente se produciría con los movimientos bruscos de la cabeza. Las células epiteliales coroideas fabrican hasta el 90 por ciento del LCR; el resto proviene de otras partes del cerebro. Cada gramo de tejido epitelial coroideo segrega fluido a un ritmo de unos 0,4 mililitros por minuto. En el hombre adulto, esto es suficiente para renovar el volumen total de LCR (aproximadamente 150 mililitros) cada tres o cuatro horas. Con la producción incesante de fluido nuevo, el LCR viejo avanza hacia la parte superior del cerebro; desde allí pasa a la sangre venosa a través de estructuras membranosas tales como las granulaciones aracnoideas, que actúan de válvulas de sentido único.

Para producir LCR, los plexos co-



2. NUTRIENTES ESENCIALES: llegan a las neuronas y células gliales del cerebro cruzando la barrera sangre-LCR, que está regulada por los plexos coroideos, o a través de la barrera hematoencefálica de los capilares cerebrales. Las moléculas hidrosolubles no pueden difundirse libremente entre la sangre y el líquido cefalorraquídeo debido a las uniones estrechas, impermeables, entre las células epiteliales coroideas; y así, las células epiteliales transfieren ciertas moléculas de un lado a otro de la barrera. Una vez dentro del LCR, las moléculas pueden difundirse a través de "goteras" de la capa ependimaria y alcanzar el fluido intersticial que rodea a las neuronas y a las células gliales. Del mismo modo, las sustancias de desecho que se encuentran en el fluido intersticial pueden penetrar en el LCR para su posterior eliminación. Las células endoteliales de los capilares cerebrales, también adheridas por uniones estrechas ("tight junctions"), controlan el intercambio directo de materiales entre la sangre y el fluido intersticial.

roideos deben extraer del plasma sanguíneo los nutrientes, iones y otras sustancias necesarias. Un flujo de sangre rápido (entre cuatro y cinco mililitros por minuto por gramo de tejido) resulta, pues, necesario para mantener la producción requerida de LCR. El flujo de sangre a los plexos coroideos puede verse seriamente alterado por muchas drogas (la vasopresina, por ejemplo) y por varios neurotransmisores (la norepinefrina). En 1985 Vincent A. Murphy, ahora en el laboratorio de neurociencia del estadounidense Instituto Nacional de Salud, y uno de nosotros (Johanson) estudiamos la sensibilidad de la barrera sangre-LCR ante los cambios de presión sanguínea. Logramos demostrar, inyectando norepinefrina en ratas, que una subida rápida de la presión arterial por encima de un umbral entre 160 y 170 milímetros de mercurio alteraba la barrera sangre-LCR bloqueando el paso de albúmina. Cabe presumir que una presión de fluido por encima del nivel umbral distienda las uniones estrechas de los plexos coroideos y atente contra la estabilidad química del medio cerebral.

Aproximadamente un 99 por ciento del LCR es agua, que los plexos coroideos segregan dentro de los ventrículos mediante la creación de gradientes iónicos a ambos lados de sus membranas. El proceso en virtud del cual esto ocurre es complejo, aunque admite una presentación simplificada. Las moléculas de agua de las células epiteliales coroideas se disocian dando iones hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-). Los iones hidroxilo se combinan con dióxido de carbono intracelular (un producto del metabolismo celular) para formar iones bicarbonato (HCO_3^-). En la superficie basolateral de las células, los iones hidrógeno se intercambian por iones sodio (Na^+) extracelulares, del plasma sanguíneo. Acto seguido, los iones sodio capturados son bombeados por el lado opuesto de las células, a través de la superficie apical, hacia los ventrículos. Este flujo de iones de sodio provoca un exceso de carga positiva en los ventrículos; iones cloro (Cl^-) y bicarbonato, cargados negativamente, acuden hacia el espacio ventricular para neutralizar la carga. Al objeto de mantener el equilibrio osmótico, el agua también se difunde hacia el interior de los ventrículos. De este modo se consigue que el agua y muchos de los iones que necesita el cerebro segreguen dentro de los ventrículos en forma de LCR.

Las concentraciones de iones sodio, potasio, calcio, magnesio y cloro en el LCR no varían mucho, ni siquiera en condiciones extremas de dieta o ambientales. Conforme el LCR fluye a través de los ventrículos, su composición se modifica ligeramente por la difusión a través de la capa ependimaria. Y lo que es más importante, las concentraciones precisas de iones en el LCR recién formado se mantienen aproximadamente iguales, aun cuando fluctúen sus concentraciones en la sangre; esto ocurre sólo en el caso de que los plexos coroideos posean mecanismos de ajuste de las tasas de transporte de iones entre la sangre y el LCR.

En un serie de estudios, uno de nosotros (Johanson) y Quentin R. Smith, actualmente en el laboratorio de neurociencia del Instituto Nacional de la Salud, encontramos pruebas adicionales de que los plexos coroideos regulaban, de forma activa, el transporte de iones. Medimos simultáneamente las concentraciones de iones en muestras de LCR y plasma de ratas; determinamos las concentraciones de estos iones en el epitelio de los plexos coroideos. Un análisis de los gradientes iónicos a través de las membranas de las células epiteliales, junto con resultados de otros experimentos, reveló que había en juego algo más que una mera difusión pasiva: mecanismos activos de los plexos coroideos determinaban concentraciones de iones sodio y cloro más elevadas en el LCR que en el plasma. Concretamente, estos mecanismos activos introducían rápidamente iones cloro y sodio en las células epiteliales a través de sus membranas basolaterales. Otros mecanismos especializados de las membranas apicales facilitaban el trasvase de estos iones al LCR.

Iones y agua no son las únicas sustancias que las células del cerebro deben obtener de la sangre para mantenerse sanas. En ausencia de un suministro adecuado de glucosa como fuente de energía, el cerebro de un mamífero pierde el conocimiento en cuestión de minutos y muere. La falta de la vitamina tiamina tiene efectos neurológicos ampliamente estudiados, que incluyen pérdida de memoria y parálisis de los movimientos oculares. Otras moléculas vitales para el cerebro son los aminoácidos, que se utilizan para sintetizar proteínas, y los ribonucleósidos y desoxirribonucleósidos, que son los sillares para la síntesis de ARN y ADN, respectivamente. A la vista de la eficacia de las barreras sangre-LCR y hematoencefálica para impedir el paso a las moléculas hidrosolubles, ¿cómo llegan los nutrientes a las células del cerebro?

La respuesta reside en lo siguiente: en las barreras hay sistemas de transporte específicos que llevan nutrientes desde la sangre al LCR o directamente al fluido intersticial del cerebro. Sin embargo, la barrera hematoencefálica y la barrera sangre-LCR no operan de la misma manera; cada una está especializada para transportar hasta el cerebro tipos específicos de nutrientes mediante mecanismos diferentes.

La barrera hematoencefálica de los capilares cerebrales se encarga del transporte de las sustancias que el cerebro consume rápidamente y en grandes cantidades: glucosa, aminoácidos, lactato y ribonucleósidos. Las células endoteliales que forman los capilares cerebrales poseen sistemas de *difusión facilitada* peculiares que transportan rápida y directamente moléculas hacia el interior del cerebro. La difusión facilitada es un proceso que utiliza "transportadores" especiales que acarrean moléculas a través de una membrana sin consumir energía. Podemos imaginarnos a estos "transportadores" como "puertas" especializadas de proteína, que se abren selectivamente y dejan paso libre a ciertas moléculas y se lo cierran a otras. Las moléculas fluyen en ambos sentidos a través de la membrana, si bien el flujo neto procede desde el lado donde la concentración es más elevada hacia el de concentración menor. El cerebro consume glucosa rápidamente; por ello, la concentración de glucosa en el fluido intersticial y en el LCR suele ser más baja que en el plasma sanguíneo. Por consiguiente, el flujo neto de glucosa a través de la barrera hematoencefálica se da, por lo común, en la dirección deseada.

Frente a ello, los plexos coroideos están capacitados para transferir nutrientes al LCR por mecanismos más complejos e indirectos. En general, los plexos coroideos regulan el transporte de algunos "micronutrientes": sustancias que son esenciales para el cerebro pero que sólo se requieren en cantidades bastante pequeñas durante períodos prolongados. Entre éstos se cuentan la vitamina C, los folatos (del grupo del complejo vitamínico B), desoxirribonucleósidos y vitamina B_6 (piridoxina). (Pequeñas cantidades de glucosa y de tiamina atraviesan también los plexos coroideos, probablemente por difusión facilitada, pero su contribución al metabolismo cerebral es mínima.)

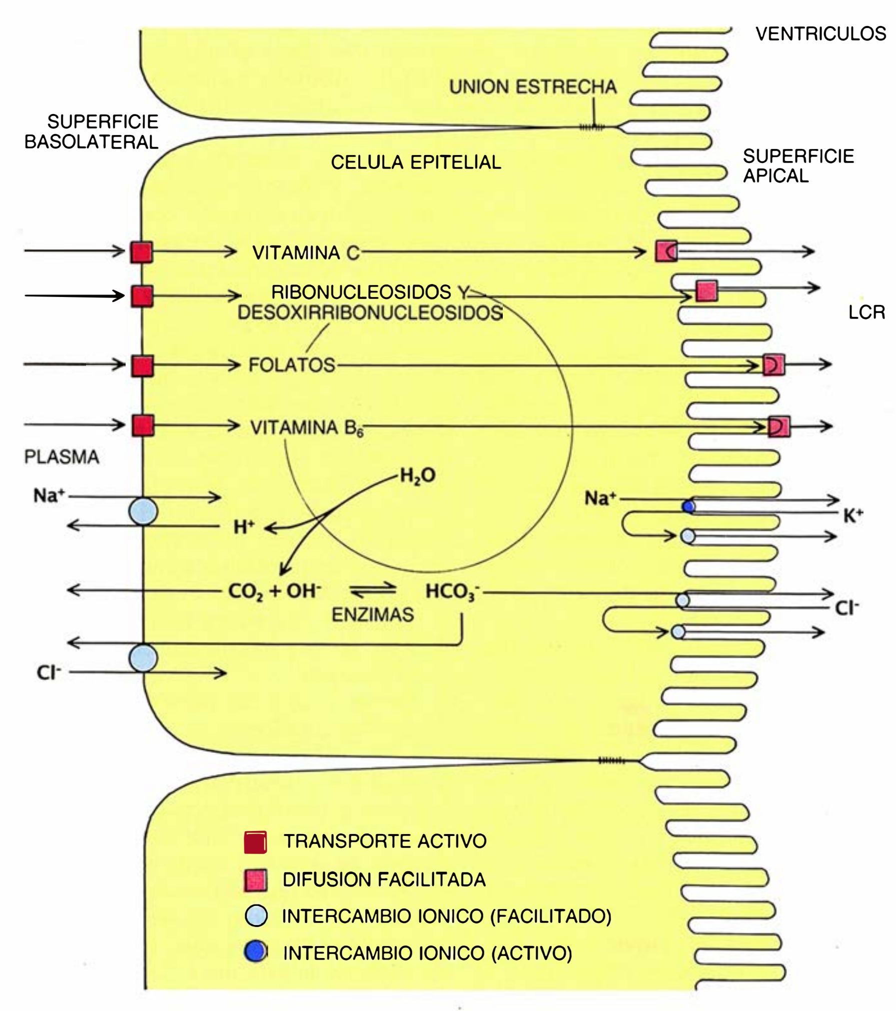
Las concentraciones de micronutrientes en el plasma sanguíneo son normalmente bajas; para extraerlos de la sangre, los plexos coroideos recurren a mecanismos de *transporte activo*. A diferencia de la difusión facilitada, el proceso de transporte activo consume energía al bombear moléculas "cuesta arriba", en contra de sus gradientes, concentrándolas en un lado de la barrera sangre-LCR. Transportadores que actúan como bombas en la superficie basolateral de las células epiteliales coroideas bombean micronutrientes desde la sangre hasta el interior del citoplasma celular. Cuando los micronutrientes se han concentrado en el citoplasma, se liberan al LCR a través de la superficie apical de la célula, probablemente por difusión facilitada. Los mecanismos de transporte activo presentes en los plexos coroideos son eficaces: los que se encargan del transporte de vitamina C y folatos a través de las membranas celulares, por ejemplo, suelen concentrar estos nutrientes en el LCR hasta niveles que cuadruplican los habituales en el plasma sanguíneo.

Ambos tipos de mecanismos –difusión facilitada en los capilares cerebrales y transporte activo en los plexos coroideos– regulan estrechamente las concentraciones de moléculas que se dirigen hacia el LCR y hacia el fluido intersticial del cerebro. Su habilidad reguladora es consecuencia directa del hecho de contar con un número limitado de transportadores de moléculas.

En todos los sistemas de transporte, si la concentración de un nutriente en el plasma sanguíneo rebasa cierto nivel, todos los transportadores para ese nutriente quedan ocupados y se dice que el mecanismo de transporte se encuentra "saturado". Un incremento ulterior de la concentración del nutriente en la sangre no conlleva un aumento significativo de su concentración en el LCR o en el fluido intersticial. En los plexos coroideos, varios sistemas de transporte de vitaminas se hallan a medio saturar con las concentraciones normales de vitaminas en la sangre. Por bastar incrementos mínimos del contenido en vitamina de la sangre para saturar del todo esos sistemas, las concentraciones de estas vitaminas en el LCR se encuentran rigurosamente limitadas. Al contrario, si la concentración de un micronutriente en el plasma es anormalmente baja, los transportadores de los plexos coroideos extraen una cantidad proporcionalmente mayor de moléculas de micronutrientes de la sangre para mantener su concentración en el LCR.

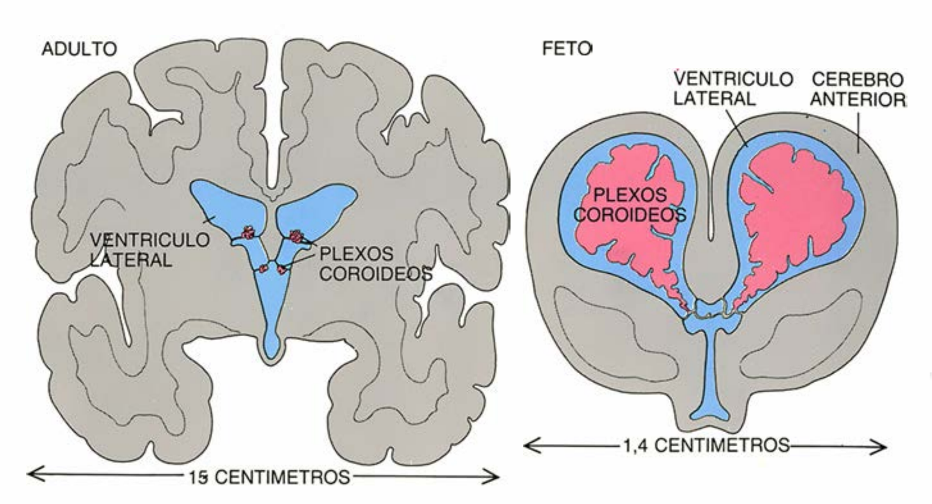
Existen diferencias importantes entre la difusión facilitada y el transporte activo que confieren ciertas ventajas a cada mecanismo. Dado que la difusión facilitada no requiere un aporte de energía, es ideal para transportar glucosa y otros nutrientes que deben incorporarse al cerebro de forma continua y en grandes cantidades. El transporte activo necesita energía, pero suministra micronutrientes al LCR en concentraciones más elevadas de las que permitiría la difusión facilitada. Es más, dado que el transporte activo es un proceso estrictamente unidireccional, la sangre, pobre en micronutrientes, no puede extraer los del LCR como ocurriría si su transporte se realizase por difusión facilitada. De hecho, el transporte activo y la difusión facilitada son sistemas de regulación complementarios, cada uno de los cuales contribuye de manera decisiva a la estabilidad química del cerebro.

¿Cómo han adquirido los plexos coroideos y los capilares cerebrales especializaciones tan distintas? No existe aún una respuesta definitiva. En nuestra opinión, la ruta a través de los plexos coroideos pudo haber desempeñado un papel más destacado en el transporte de glucosa y otros nutrientes principales en estadios tempranos de la evolución de los mamíferos, cuando el cerebro anterior era bastante pequeño y mayores, en proporción, los plexos coroideos. Hay indicios de que, durante el desarrollo del feto, cuando los plexos coroideos son enormes y llenan casi por completo los ventrículos laterales, aquéllos presentan probablemen-



3. FLUJO DE MOLECULAS a través de la barrera sangre-LCR; está regulado por varios mecanismos que hay en los plexos coroideos. Algunos micronutrientes, como la vitamina C, son empujados a través de la superficie basolateral de las células epiteliales por medio de un proceso que consume energía, conocido como transporte activo; los micronutrientes son liberados al LCR en la superficie apical por otro proceso regulado, la difusión facilitada, que no requiere energía. Los iones esenciales se intercambian también, de manera controlada, entre el líquido cefalorraquídeo y el plasma sanguíneo. El transporte de un ion en una dirección está ligado al transporte de un ion diferente que procede en la dirección opuesta, como ocurre con el intercambio de iones sodio (Na^+) por K^+.

te una función nutritiva generalizada. Las células epiteliales coroideas de los fetos contienen cantidades significativas de glucógeno, una molécula que puede degradarse en glucosa y transportarse hasta el LCR. Ahora bien, con la importante expansión del cerebro anterior en el curso de la evolución de los seres humanos y de otros mamíferos, los plexos coroideos resultaron, quizá, demasiado pequeños para proporcionar un suministro adecuado de glucosa y otros nutrientes al tejido cerebral adulto. A partir de ese momento, la amplia red de capilares cerebrales estaría más capacitada, o así parece, para satisfacer las principales demandas del cerebro de los mamíferos, mientras que los plexos coroideos serían más adecuados para el suministro de micronutrientes.



4. PLEXOS COROIDEOS DEL FETO, mayores en proporción que los de un ser humano adulto; ocupan también más espacio dentro de los ventrículos. Esta observación sugiere que los plexos coroideos podrían desempeñar un papel de especial relevancia en la alimentación del cerebro en desarrollo; su importancia pudo haber sido, asimismo, mayor en estadios tempranos de la evolución.

Al objeto de determinar si un micronutriente entra en el cerebro fundamentalmente por transporte activo a través de la barrera sangre-LCR, deben cumplirse cuatro criterios. Primero, la difusión de dicha sustancia a través de la barrera hematoencefálica ha de ser casi nula. Segundo, cuando se inyecta esa sustancia en la sangre, debe acumularse rápidamente en los plexos coroideos y luego en el LCR, seguido de una difusión más lenta por el líquido intersticial del cerebro. Tercero, los resultados experimentales sobre la especificidad y el comportamiento de un posible sistema de transporte de nutrientes en los plexos coroideos han de corresponderse con la actividad del sistema en un organismo; es decir, el sistema de transporte "in vitro" debe ser capaz de reproducir las concentraciones de nutriente observadas en el cerebro vivo. Finalmente, la sustancia debe poderse difundir desde el LCR hasta células del cerebro separadas del LCR por tejido de más de un centímetro de grosor.

Uno de nosotros (Spector) y varios colegas de la Universidad de Harvard y de la Universidad de Iowa hemos realizado experimentos que prueban que los cuatro criterios se cumplen para la vitamina C y que al menos tres de los cuatro son válidos para el transporte de desoxirribonucleósidos, folatos y vitamina B_6. Los experimentos revelaron también diferencias importantes entre varios de los sistemas de transporte activo localizados en los plexos coroideos.

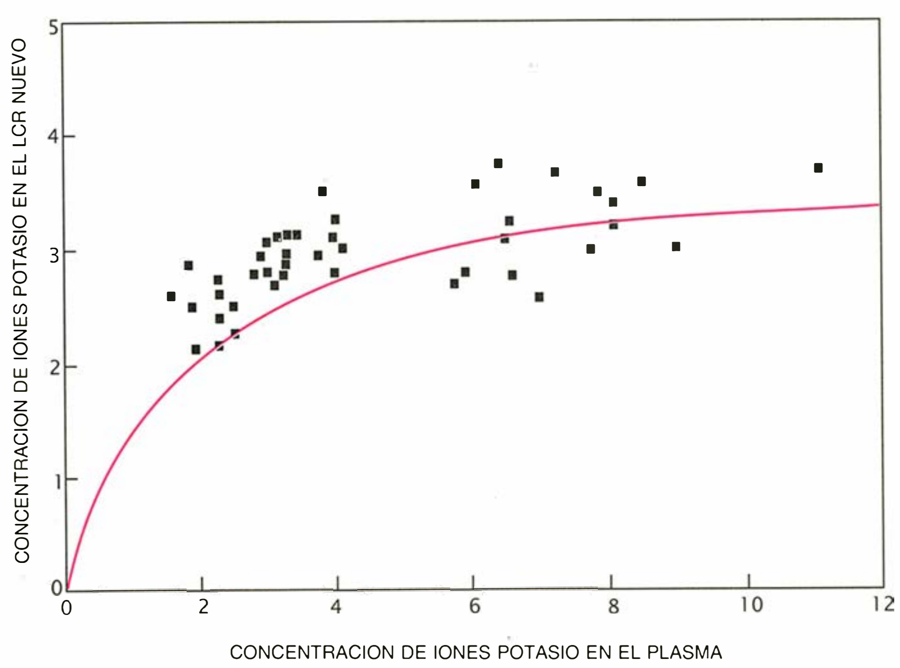
Los sistemas de transporte de vitaminas en la barrera sangre-LCR, por ejemplo, son a veces excepcionalmente selectivos. Las moléculas de ácido ascórbico (vitamina C) y de isoascorbato (un conservante de alimentos corriente) son estereoisómeros: difieren únicamente en la disposición geométrica de sus átomos. Sin embargo, según Spector y Antonio V. Lorenzo, del Hospital Infantil de Boston, si la sangre contiene la misma concentración de ambas moléculas, los plexos coroideos transportan al LCR 20 veces más ácido ascórbico que isoascorbato.

En cambio, el transporte de desoxirribonucleósidos y ribonucleósidos, dos clases distintas de moléculas, está regulado por un sistema único en los plexos coroideos. (Los ribonucleósidos, pero no los desoxirribonucleósidos, pueden cruzar la barrera hematoencefálica.) En consecuencia, ribonucleósidos y desoxirribonucleósidos compiten por el acceso a las moléculas transportadoras, de suerte que el nucleósido que sea más abundante en el plasma sanguíneo será transportado al LCR a un ritmo mayor. Pero incluso este sistema posee cierta selectividad: no transporta citarabina, un agente quimioterapéutico relacionado con los nucleósidos, que sí son transportados. Parece ser que los sistemas de transporte de los plexos coroideos tienen sólo afinidad por nucleósidos con ciertas características estructurales.

No todas las funciones que desempeñan los plexos coroideos conllevan un bombeo de materiales desde la sangre hasta el LCR; en ocasiones realizan el proceso inverso. Los plexos coroideos desempeñan un importante papel en la limpieza del LCR de sustancias de desecho que se forman en los tejidos cerebrales como subproductos de reacciones metabólicas. Es necesario mencionar que, aunque los plexos coroideos y los riñones llevan a cabo funciones excretoras análogas, mueven materiales en direcciones opuestas. El riñón extrae productos de desecho de la sangre, mientras que los plexos bombean productos de desecho a la sangre.

Los plexos coroideos poseen varios sistemas de transporte activo de "limpieza". Uno elimina específicamente iodo y otros pequeños iones inorgánicos del LCR. Otros sistemas limpian el LCR de drogas, incluidos antibióticos (penicilinas y cefalosporinas). Muchos compuestos que se sintetizan en el interior del cerebro, piénsese en los derivados metabólicos de los neurotransmisores, son también eliminados por los plexos coroideos. Spector y Edward J. Goetzl, de la Universidad de California en San Francisco, han observado que los plexos coroideos transportan leucotrieno *C*4, un compuesto inmunológico implicado en la inflamación, del LCR a la sangre. Si se acumulase leucotrieno *C*4 en el interior del cerebro podría hincharse por exceso de fluido, una situación peligrosa. El rápido transvase de esta sustancia a la sangre la dispersa y permite su detoxificación por el hígado o los riñones.

Algunos productos de desecho son directamente eliminados del cerebro por el flujo constante de LCR procedente de los plexos coroideos. Como el LCR recién sintetizado contiene pocas o ninguna de estas sustancias, se establece una difusión neta de moléculas de desecho hidrosolubles desde el fluido intersticial hacia el LCR. Andando el tiempo, el LCR, ligeramente contaminado con sustancias de desecho, abandona el sistema



5. CONCENTRACION de iones potasio (K^+) en el líquido cefalorraquídeo recién segregado; no varía mucho, ni siquiera cuando su concentración en la sangre sube y baja de forma drástica. Los mecanismos de transporte de potasio en los plexos coroideos se encuentran virtualmente saturados a las concentraciones sanguíneas normales: casi todos los transportadores están ocupados en el acarreo de iones potasio. Un incremento en el nivel de potasio de la sangre apenas repercute en el nivel de potasio en el LCR porque quedan pocos transportadores libres para mover iones adicionales. Estos datos fueron recogidos por Adelbert Ames III, adscrito a la Facultad de Medicina de Harvard.

nervioso central a través de las granulaciones aracnoideas u otros puntos de drenaje, en dirección a la sangre.

Otra función que parecen cumplir los plexos coroideos es la secreción de ciertas proteínas. Debido a las barreras sangre-LCR y hematoencefálica, la concentración total de proteína en el LCR viene a ser del 0,5 por ciento de la contenida en el plasma; sin embargo, varias proteínas están presentes en concentraciones mucho más elevadas en el LCR. Una de estas proteínas es la prealbúmina, que participa, eso se cree, en el transporte de hormonas tiroideas y vitamina A de la sangre al cerebro. Gramo por gramo, los plexos coroideos contienen al menos 100 veces más ARN mensajero para la prealbúmina que el hígado. No se encuentra ARN mensajero para prealbúmina en ninguna otra parte del cerebro. Como el ARN mensajero para prealbúmina es un precursor genético de la proteína de prealbúmina, estos resultados sugieren que los plexos coroideos sintetizan prealbúmina y la transfieren después al LCR.

Otras proteínas segregadas por los plexos coroideos pudieran desempeñar importantes funciones en ciertos aspectos del desarrollo del cerebro. Hace ya tres décadas que los fisiólogos rusos N. S. Volzhina y Boris N. Klosovsky observaron que el sistema nervioso de un cachorro se atrofiaba si se extirpaban sus plexos coroideos. Los efectos de proteínas liberadas por los plexos coroideos constituyen un área apasionante, de potencial riqueza, para investigaciones futuras en neurobiología.

Habida cuenta de las múltiples maneras en que los plexos coroideos contribuyen a mantener el tono del cerebro, a nadie debiera sorprender que las disfunciones de este tejido provoquen graves enfermedades. Tumores de gran tamaño en los plexos coroideos pueden obstruir el flujo de LCR o comprometer la circulación cerebral por la presión que ejercen sobre el tejido cerebral; el adenoma benigno, tumor poco frecuente, produce LCR en demasía. Estos adenomas segregan de tres a cinco veces más LCR de lo normal, desbordando los mecanismos de que dispone el cerebro para reabsorber el fluido. Se produce entonces una hidrocefalia, más comúnmente conocida como "agua en el cerebro". A medida que el exceso de LCR se acumula en los ventrículos, va ejerciendo una presión anormalmente alta sobre los tejidos cerebrales, dañándolos. Aunque existen drogas y procedimientos de eliminación del fluido para el tratamiento de esta enfermedad, la extirpación del adenoma hipersecretor constituye la mejor solución, siempre que sea quirúrgicamente posible.

Los plexos coroideos tienen una doble función en el tratamiento de pacientes con meningitis bacteriana, unas veces facilitando y otras impidiendo su curación. En este tipo de meningitis, las bacterias se infiltran en el LCR y en los plexos coroideos, donde causan inflamación. Según indicamos anteriormente, antibióticos como las penicilinas y la mayor parte de cefalosporinas son activamente eliminados del LCR en grado variable; la concentración de penicilina G en el LCR de un mamífero sano es tan sólo un 1 por ciento de la que se encuentra en el plasma. Por consiguiente, en condiciones normales la barrera sangre-LCR dificulta el que la penicilina G mate bacterias dentro del cerebro. Sin embargo, Spector y Lorenzo han demostrado que la inflamación que acompaña a la meningitis provoca la aparición de "goteras" en los plexos coroideos, lo que lleva a una ruptura parcial de la barrera sangre-LCR. Por tanto, las concentraciones de penicilina G en el LCR de mamíferos con meningitis oscilan entre el 2 y más del 20 por ciento de las correspondientes concentraciones en el plasma. En muchos casos, tales concentraciones de penicilina son suficientes para matar las bacterias o retrasar su crecimiento en el LCR. Pero a medida que cesa la inflamación y los plexos coroideos recuperan su funcionalidad plena, éstos empiezan de nuevo a bombear vigorosamente penicilina fuera del LCR. Si quedan bacterias vivas en el LCR cuando el funcionamiento de los plexos coroideos vuelve a la normalidad, existe la posibilidad de que se produzca una recaída en la infección. Por este motivo, los médicos prefieren tratar muchos tipos de meningitis con antibióticos, tales como el cloramfenicol, que típicamente alcanzan niveles elevados en el LCR, o bien con antibióticos, como la ceftriaxona, que no son transportados activamente fuera del LCR con la facilidad de la penicilina G.

Un efecto más especulativo de los cambios patológicos que afectan a los plexos coroideos, a saber, el deterioro de la función cerebral, puede ocurrir en las personas mayores. Parece probable que los plexos coroideos, como tantos otros órganos, se deterioren con la edad. Por este motivo, algunos investigadores sospechan que ciertos tipos de enfermedades degenerativas del cerebro pueden estar, en parte, motivados por un funcio-

namiento inadecuado de los plexos coroideos y una consiguiente desnutrición cerebral. Sin embargo, esta idea todavía no está comprobada experimentalmente.

Conforme avanza el conocimiento del papel que desempeñan los plexos coroideos en la enfermedad y en la salud, se hace patente que la manipulación de sus diversas funciones promete importantes aplicaciones clínicas. El creciente nivel de conocimientos sobre los efectos de neurotransmisores y hormonas en la actividad de los plexos coroideos puede facilitar el desarrollo de nuevos tratamientos.

Un área merecedora de mayor atención es la relativa a la alteración de la tasa de producción de LCR. El grueso de los esfuerzos por alterar la producción de LCR se ha empeñado en la inhibición de su flujo, en gran medida porque las drogas que ejercen este efecto tendrían aplicaciones obvias en el tratamiento de la hidrocefalia y del edema cerebral, enfermedades en que el fluido acumulado causa daño al cerebro.

La manipulación de los equilibrios de varios iones en el LCR pudiera ser igualmente beneficiosa. Se sabe, por ejemplo, que, cuando la concentración de iones potasio en el LCR es elevada, las neuronas se excitan y se despolarizan con mayor facilidad y rapidez. Algunas drogas anticonvulsivas para el tratamiento de la epilepsia, como la fenitoína, pudieran funcionar en parte por estimulación del transporte de iones potasio fuera del LCR a través de los plexos coroideos. Los iones calcio y magnesio intervienen también en las tasas de despolarización de las neuronas; además, inducen una dilatación de las arterias cerebrales. Si conociéramos mejor el flujo de estos iones a través de la barrera sangre-LCR, podríamos diseñar, algún día, drogas que alterasen las concentraciones de iones calcio o magnesio, de suerte tal que se minimizasen los riesgos o las consecuencias de la epilepsia.

El tratamiento del SIDA progresaría también si entendiésemos plenamente los mecanismos de transporte y su regulación en los plexos coroideos. Actualmente se sabe con certeza que el virus causante del SIDA es capaz de invadir el sistema nervioso central; una consecuencia habitual de esta invasión es la demencia. Escondido en el interior del cerebro, el virus del SIDA se encuentra en un santuario inaccesible a muchos agentes antivíricos que no pueden cruzar la barrera sangre-LCR o la barrera hematoencefálica. Cualquier posible terapia para el tratamiento del SIDA está condenada al fracaso a menos que llegue hasta las células del cerebro infectadas por el virus.

Afortunadamente, uno de los agentes más eficaces que se prescriben para el tratamiento del SIDA –azidotimidina (AZT), también conocida como zidovudina– cruza la barrera sangre-LCR y penetra en el cerebro. La AZT es un nucleósido que parece poseer afinidad por el sistema de transporte de nucleósidos de los plexos coroideos. Hasta la fecha, constituye el único agente antivírico conocido que suprime al virus del SIDA en el tejido cerebral humano. No obstante, la AZT y otras drogas contra el SIDA serían más eficaces si pudieran llegar al fluido intersticial del cerebro antes y en mayor concentración. Abrigamos la esperanza de que la investigación sobre los plexos coroideos y la barrera sangre-LCR permita descubrir técnicas que incrementen el transporte de AZT hacia el interior del sistema nervioso central o, alternativamente, impulse el desarrollo de nuevos agentes nucleosídicos que penetren con mayor facilidad a través de las barreras.

Cuando la fisiología de los plexos coroideos era poco conocida, el tejido parecía pequeño y pasivo en comparación con la amplia red de capilares cerebrales. Hoy se sabe que los plexos coroideos son un importante punto clave de paso en el intercambio de ciertas proteínas, vitaminas, iones, aminoácidos, nucleósidos y otras moléculas entre la sangre y el LCR. Su papel en la conservación de la estabilidad del sistema nervioso central es único. Los beneficios clínicos que pueden derivarse de un mejor entendimiento de los plexos coroideos y de la barrea sangre-LCR son considerables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VITAMIN HOMEOSTASIS IN THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM. Reynold Spector en *New England Journal of Medicine*, vol. 296, págs. 1393-1398; 16 de junio de 1977.

POTENTIAL FOR PHARMACOLOGIC MANIPULATION OF THE BLOOD-CEREBROSPINAL FLUID BARRIER. Conrad E. Johanson en *Implications of the Blood-Brain Barrier and Its Manipulation*, vol. 1. Dirigido por Edward A. Neuwelt. Plenum Press, 1989.

MICRONUTRIENT HOMEOSTASIS IN MAMMALIAN BRAIN AND CEREBROSPINAL FLUID. Reynold Spector en *Journal of Neurochemistry*, en prensa.

Neptuno

El Voyager 2 *ha encontrado un mundo tormentoso y una luna helada moldeada por el vulcanismo*

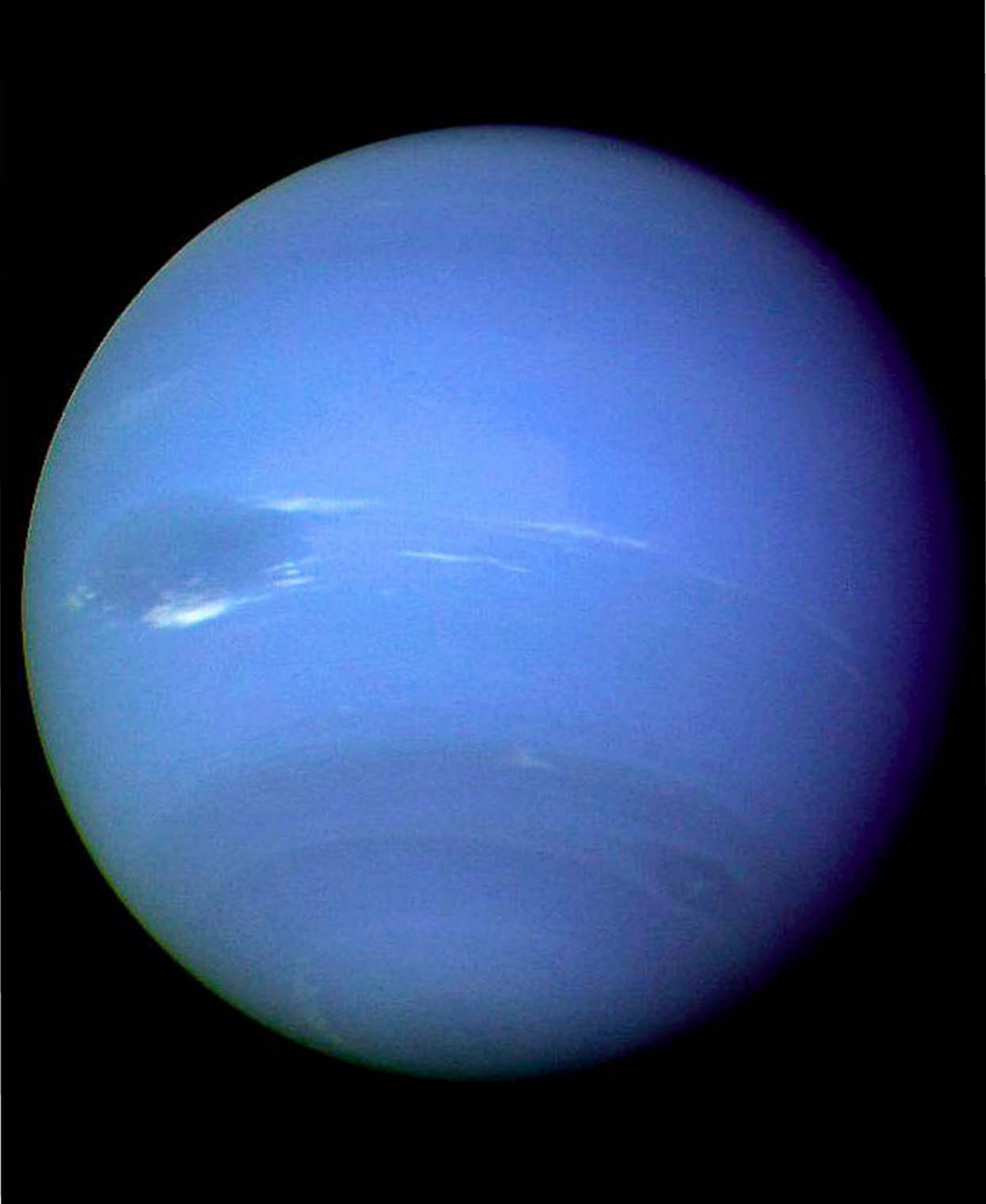
June Kinoshita

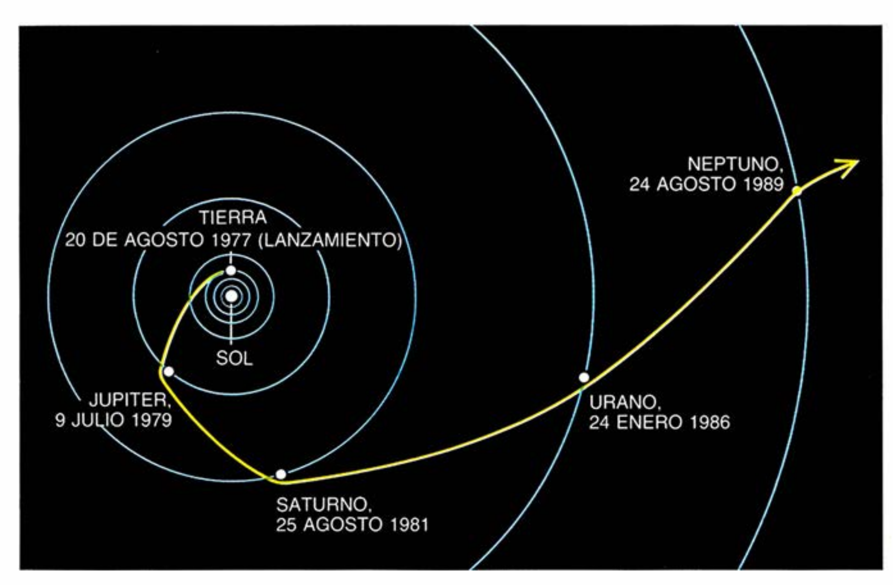
Durante la noche de 24 de agosto, un pequeño artilugio anguloso se lanzó a toda velocidad por encima de las nubes de Neptuno. Dio una amplia pasada a unos 5000 kilómetros de altitud sobre el polo Norte del gran planeta azul, se sumergió en su mitad nocturna, rebasó a su gran luna Tritón a una distancia de unos 38.000 kilómetros y se esfumó en el vacío. Durante ese breve encuentro, el visitante tomó miles de imágenes y las radió en dirección a la Tierra. Los científicos que aguardaban en el Laboratorio de Propulsión a Chorro, en Pasadena, jalearon eufóricos las imágenes que iban concretándose en las pantallas –la primera mirada de cerca que podía echar el ser humano sobre el octavo planeta– y descorcharon las botellas de champán.

La sonda *Voyager 2* había necesitado 12 años para llegar a Neptuno, cuarto y definitivo destino de un periplo planetario que hizo escala primero en Júpiter y Saturno (previamente visitados también por la sonda espacial gemela, *Voyager 1*), y después en Urano. De todos los planetas del itinerario, era Neptuno el menos conocido. Tras poner a punto los programas del ordenador de a bordo y disparar vivazmente los cohetes impulsores, el equipo encargado del Voyager pilotó la veterana nave y la llevó a un encuentro impecable. Procesando señales que al llegar a la Tierra poseían una potencia de menos de 10^{-16} watt, el equipo científico consiguió plasmar imágenes cuya nitidez dejaba sin aliento. *Investigación y Ciencia* ofrece en estas páginas los últimos frutos del épico peregrinaje.

*1. EL GLOBO de Neptuno, azul y listado por tormentas, aparece en esta imagen tomada desde una distancia de 6,6 millones de kilómetros (*derecha*). Un pasado geológico de gran violencia llenó de cicatrices el rostro de Tritón, la mayor de las lunas (*abajo*).*







2. EXTRAORDINARIO VIAJE de la nave Voyager por los planetas exteriores: aprovechó una disposición de los planetas que tan sólo acontece una vez cada 176 años, merced a la cual la sonda se ha ido catapultando de un planeta al siguiente por efecto de la gravedad. Diseñada en principio para visitar sólo Júpiter y Saturno, la sonda Voyager fue reprogramada, en pleno vuelo, desde la Tierra para que operase en Urano y después en Neptuno, que es en este momento el planeta más lejano del sistema solar, pues la órbita de Plutón, excéntrica, le ha situado en el interior de la órbita de Neptuno. La nave espacial planeó sobre el polo norte de Neptuno, pasó a gran velocidad junto a Tritón y prosiguió viaje en dirección sur, hacia el exterior del sistema solar.

En una órbita situada a 4500 millones de kilómetros del Sol, donde la iluminación solar es tan sólo una milésima de la terrestre, Neptuno asoma apenas como una débil motita verde pálido en los más potentes telescopios de la Tierra. Tanto es así que el planeta fue descubierto hace escasamente 143 años, cuando los astrónomos especulaban que las anomalías de la órbita de Urano podrían resultar explicables por la atracción gravitatoria de un octavo planeta. Desde entonces, los observatorios han dado valores estimativos de la masa de Neptuno, de su tamaño y composición, datos todos los cuales sugerían que Neptuno sería muy similar a su "gemelo" Urano, un planeta pacífico y fofo. Para sorpresa de todos, el *Voyager 2* reveló un mundo turbulento, con gigantescos sistemas de tormentas que rivalizan con los jovianos, y nubes efímeras, en nada semejantes a lo visto hasta ahora en planetas gaseosos.

Neptuno, al igual que Urano, es una gran bola de agua y roca fundida, envuelta en una atmósfera de hidrógeno y helio mezclados con metano. El metano absorbe la luz roja y es responsable de la tonalidad azul-verdosa del planeta. A diferencia de Urano, la atmósfera de Neptuno exhibe estriaciones características y gigantescas manchas oscuras de tormentas, amén de un huracán de anchura comparable al diámetro terrestre, al que los científicos se han apresurado a bautizar Gran Mancha Oscura. Detectada por vez primera el pasado invierno, por el *Voyager 2*, esta inmensa tormenta se halla situada a unos 22 grados de latitud Sur y parece agitarse y girar en sentido antihorario. Las cámaras captaron posteriormente una mancha oscura menor, situada más al sur. Las imágenes del Voyager mostraron también una nube pequeña y brillante, que ha sido llamada Patinete ("Scooter"), que corre a latitud intermedia entre las manchas.

Las señales radioeléctricas que el planeta emite en haz estrecho, como un faro, revelaron que Neptuno completa una rotación sobre su eje en 16 horas y 3 minutos; aproximadamente una hora menos de lo predicho. Las imágenes obtenidas a lo largo de varias rotaciones completas revelaron que la mancha pequeña viaja casi con el mismo período de rotación y que, por tanto, permanece más o menos inmóvil en una misma posición con respecto al planeta. La Gran Mancha Oscura tarda más en completar el giro entero, alrededor de 18 horas, por lo que parece desplazarse hacia el oeste, en sentido contrario al de rotación planetaria, a unos 300 metros por segundo, es decir, 1000 kilómetros por hora, arrastrada por los más veloces vientos retrógrados que el *Voyager 2* haya cronometrado jamás.

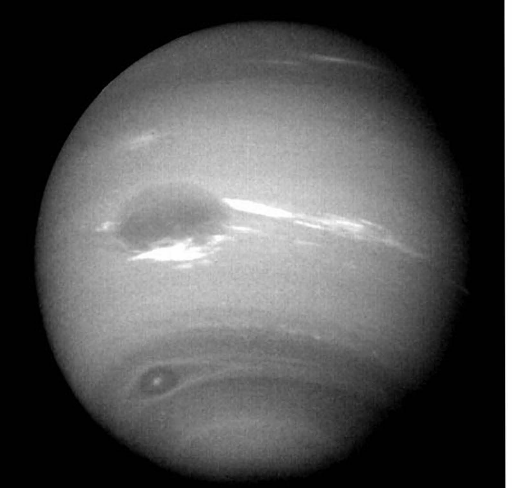
Dos horas antes de que el *Voyager 2* llegara a situarse a distancia mínima del planeta, las cámaras de la sonda enfocaron un panorama tan bello cuan sorprendente: al captar los oblicuos rayos del Sol, bancos paralelos de cirros plateados arrojaban sombras sobre el banco de nubes azuladas situadas más abajo. Basándose en la posición de las sombras y en el ángulo del Sol, miembros del grupo encargado de tratamiento de imágenes estimaron que las nubes se cernían a cosa de unos 50 kilómetros por encima de la capa subyacente. Los científicos quedaron extasiados: jamás se habían observado tales estructuras tridimensionales en la atmósfera de ninguno de los planetas gigantes.

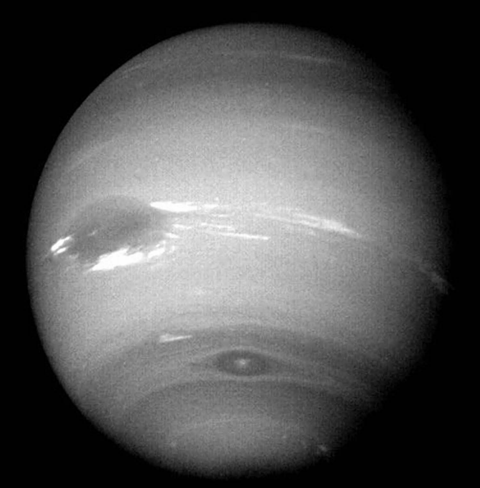
Paradójicamente, aquellos delicados filamentos nubosos daban testimonio de un gran dinamismo atmosférico. Según Robert West, del equipo fotopolarimétrico, la estratificación indicaba que Neptuno es aún más dinámico que Júpiter, el cual, aparte de su turbulenta mancha roja, tiene una capa nubosa que, aunque pintoresca, es llana. Los científicos no saben explicar todavía cómo se forman las altas nubes o por qué se extienden tan sólo a lo largo de unos pocos paralelos.

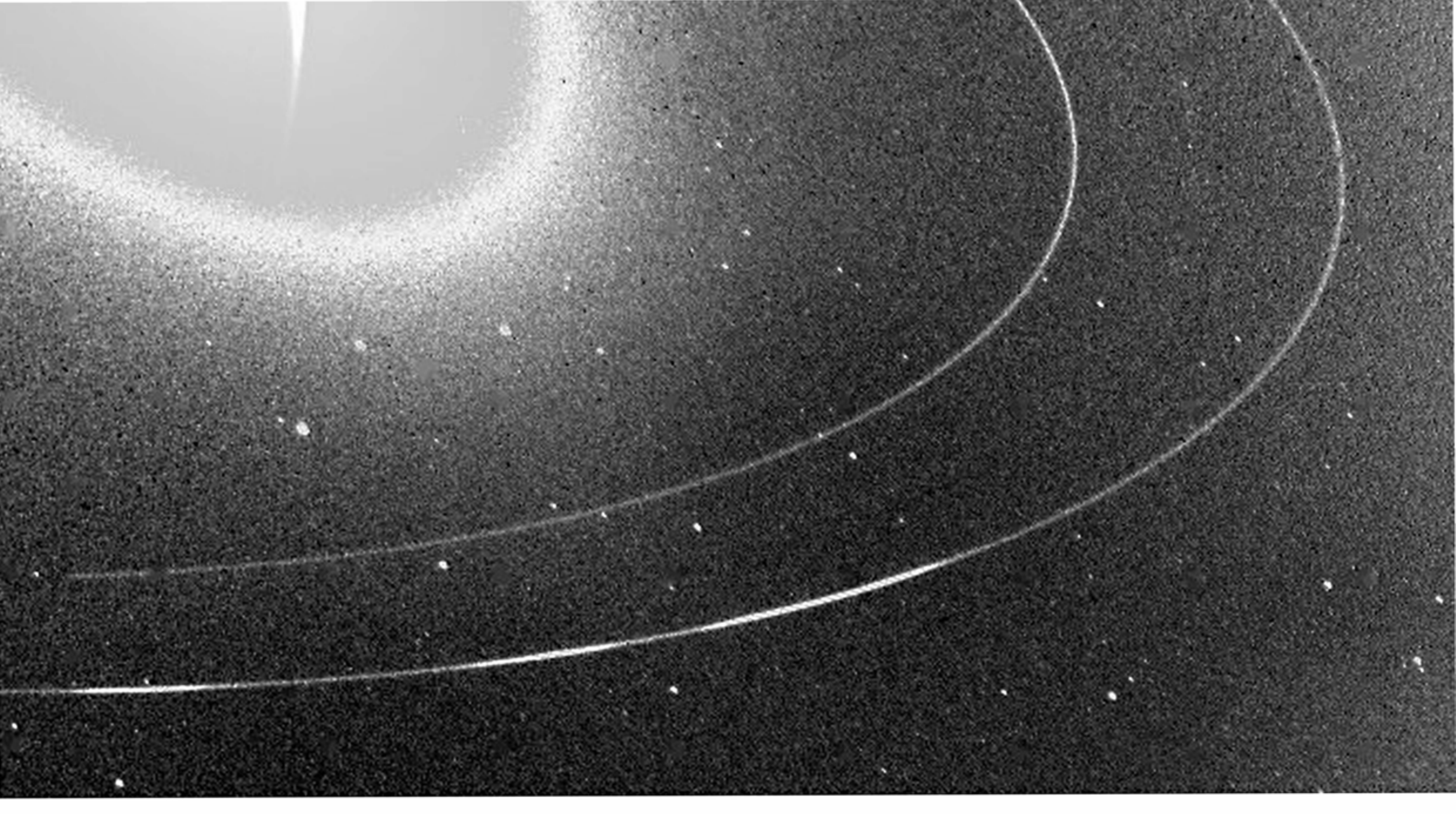
También el borde sur de la Gran Mancha Oscura estaba tapizado de cirros muy altos que formaban un brillante hoyuelo sobre el centro de la pequeña mancha oscura. Las formaciones nubosas permanecieron más o menos en la misma ubicación, a pesar de hallarse rodeadas por vientos de gran violencia. Bradford A. Smith, director del equipo de tratamiento de imágenes, especulaba sobre la posibilidad de que tiros ascendentes arrastrasen consigo metano gaseoso hasta gran altura en la atmósfera. Allí, el metano se condensa y forma nubes de partículas heladas; las corrientes descendentes arrastran entonces las nubes a regiones más cálidas, donde se disipan. Un proceso similar crea formaciones nubosas sobre las montañas terrestres.

El campo magnético de Neptuno también reservaba sorpresas: el eje del dipolo magnético se encuentra sesgado unos 50 grados con respecto al eje de rotación y está asimismo desplazado unos 10.000 kilómetros del centro del planeta. Tal descubrimiento contribuyó a aclarar un problema que había tenido perplejos a los astrónomos desde que el *Voyager 2* reveló que el eje magnético de Urano estaba inclinado de forma similar.

3. *CIRROS del hemisferio septentrional, brillantes y plateados; arrojan sombras sobre la capa nubosa azul, ubicada unos 50 kilómetros por debajo. Las nubes se extienden sobre miles de kilómetros. Dos imágenes, tomadas desde una distancia de 12 millones de kilómetros, con un intervalo de 17,6 horas, documentan el dinamismo de la atmósfera (*recuadros al pie*). El planeta efectuó algo más de una rotación completa sobre sí mismo en dicho lapso; la mancha oscura pequeña giró con la misma velocidad que el planeta.*







4. "ARCOS PERDIDOS", que resultaron ser grumos brillantes del anillo exterior de Neptuno; los vemos aquí fotografiados desde una distancia de 1,1 millones de kilómetros, cuando el Voyager se alejaba ya del planeta.

Dado que los ejes magnéticos de otros planetas tienden a coincidir con sus ejes de rotación, los científicos habían imaginado que la inclinación podría tener relación con la peculiar orientación del eje de rotación de Urano, que yace en el plano de su órbita. Otra posibilidad era que el *Voyager 2* hubiera captado al planeta en mitad de una inversión del sentido de su campo magnético.

Pero con el nuevo descubrimiento acerca del campo magnético de Neptuno, ninguna de ambas explicaciones puede seguir siendo plausible. El eje de rotación de Neptuno está casi perpendicularmente orientado respecto al plano de su órbita, como es habitual, y las probabilidades de captar a los dos planetas a mitad de procesos de inversión magnética son muy reducidas. Por otra parte, según Norman F. Ness, director de experimentos de campo magnético, los campos magnéticos sesgados son característica común de los rotores oblicuos, una clase de estrellas. Ness sugirió que los campos de los planetas podían haber tenido origen por idéntico mecanismo que el propuesto para estas estrellas: la convección de material eléctricamente conductor en una delgada capa esférica cercana a la superficie. (En la Tierra, la convección tiene lugar en un núcleo metálico fundido.)

El sesgo del campo magnético dio al traste con algunos otros de los experimentos del *Voyager 2*. Edward C. Stone, científico jefe de la misión Voyager, manifestó que los navegantes habían confiado en que, al encaminar la nave hacia el polo norte geográfico de Neptuno, le harían atravesar las líneas de campo convergentes de la zona auroral que, por lo común, se encuentran asociadas al polo magnético de un planeta. No ocurrió así. La nave penetró en la magnetosfera del planeta (una capa envolvente, rica en iones, creada por el campo magnético del planeta), a lo largo de las líneas convergentes, a las que fue siguiendo hacia el polo. Fue mala suerte. Según Stone, ninguna sonda ha seguido una ruta similar en ningún otro planeta, ni siquiera en la Tierra.

El *Voyager 2* sí tuvo ocasión de ver auroras en la atmósfera de Neptuno, pero éstas se extendían sobre una amplia región, en lugar de formar óvalos bien definidos en torno a los polos magnéticos, como en la Tierra. También se observaron auroras en Tritón. Andrew Cheng, del equipo de partículas cargadas de baja energía, informó que las partículas cargadas de los cinturones de radiación de Neptuno parecen hundirse en la atmósfera de Tritón con energía suficiente para generar las auroras ultravioletas que se observaron en él.

En una misión repleta de inesperados giros, uno de los más apasionantes consistió en la resolución de la búsqueda de los "arcos perdidos". Allá por 1984, los telescopios terrestres detectaron en torno a Neptuno lo que parecían anillos incompletos, arcos de anillos. De existir verdaderamente anillos parciales, sería la primera vez que se observaran en torno a un planeta. A principios de agosto, el *Voyager 2* pareció confirmar la presencia de arcos, pero conforme la sonda se aproximaba a su objetivo, comenzó a detectar tenues segmentos entre los arcos, y hacia el 24 de agosto, el equipo de procesamiento de imágenes anunció que los arcos formaban parte de un anillo exterior completo. Una notable fotografía de larga exposición reveló cúmulos de polvo fino de no más de 10 o 20 kilómetros de anchura, inmersos en uno de los arcos. Los científicos no han podido hasta ahora hallar una explicación plausible de la formación de los arcos. Otras imágenes revelaron que Neptuno tiene un total de cuatro anillos. Se cree que el polvo que compone los anillos está formado por los detritus despedidos al espacio a lo largo de eones, producidos por la desintegración de micrometeoritos, al estrellarse contra las lunas del planeta.

Observaciones de la luz estelar oculta por el anillo más externo indicaron que el anillo posee un núcleo denso de unos 17 kilómetros de sección, envuelto por un halo difuso de polvo de unos 50 kilómetros de anchura. Cuando el *Voyager 2* atravesó

el plano del anillo, una hora antes de su máxima aproximación al planeta, el detector de ondas de plasma transmitió una andanada de impulsos de radio generados por partículas de polvo, al estrellarse contra la nave y vaporizarse en microscópicas bocanadas de plasma. La tormenta de impulsos, reproducida a la mañana siguiente en cinta magnetofónica por Donald J. Gurnett, director del equipo de ondas de plasma, indicaba no menos de 300 impactos por segundo, equivalentes a la densidad de una partícula por cada 300 metros cúbicos, comparable al polvo del plano anular de Saturno.

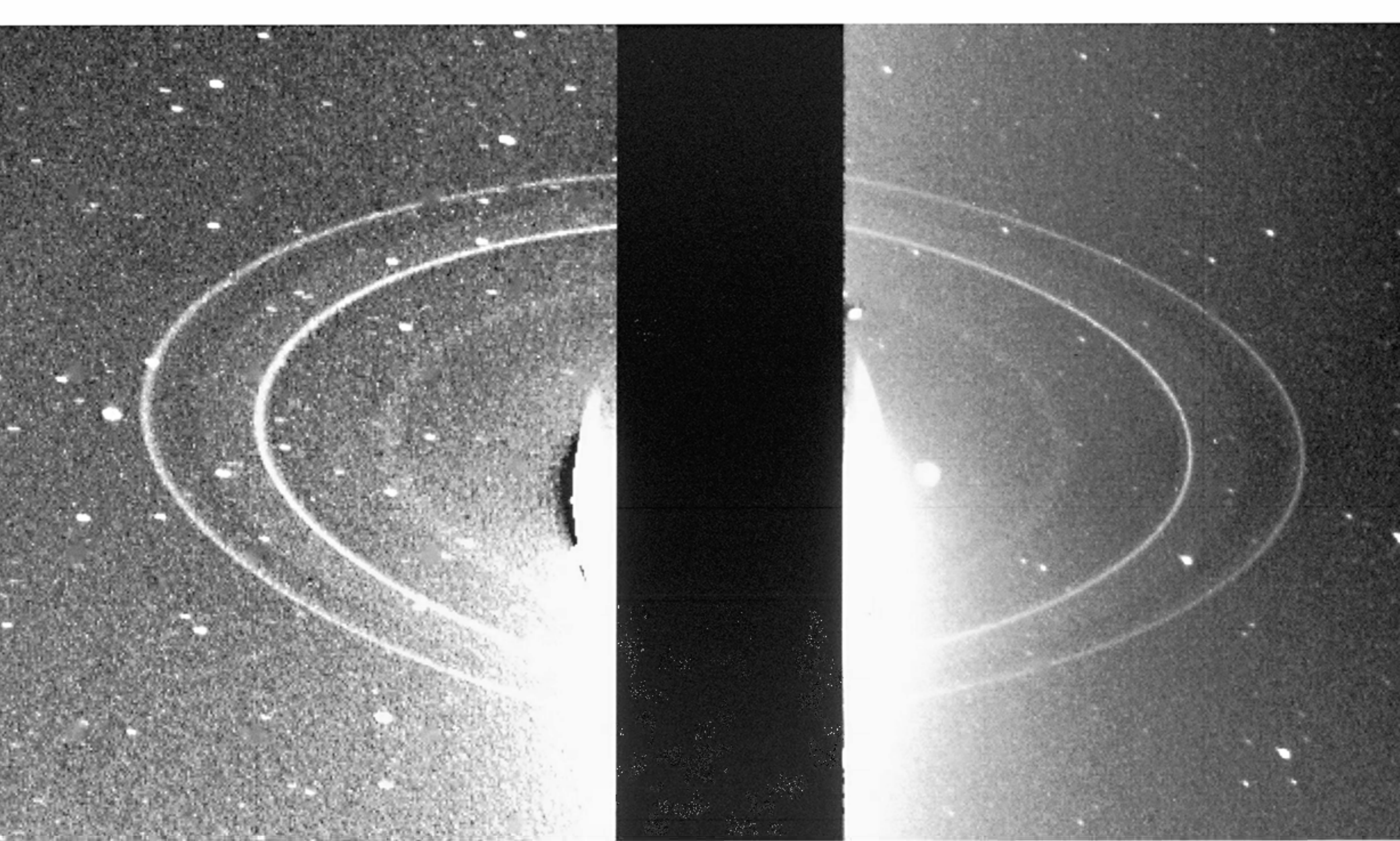
Dos de las lunas de Neptuno, Tritón y Nereida, eran conocidas ya por observación terrestre. La sonda *Voyager 2* descubrió otros seis satélites más, provisionalmente catalogados 1989 N1 a 1989 N6. Estos trozos de materia, oscuros y malhadados, tienen diámetros variables entre los 50 y los 200 kilómetros, demasiado pequeños para tener forma esférica por efecto de su propia gravedad. Las granulosas imágenes de estos cuerpos castigados por los meteoritos indican que las pequeñas lunas han permanecido esencialmente en estado sólido, sin fundirse, desde los tiempos en que se formaron.

Todas las lunas recién descubiertas orbitan en las cercanías del plano ecuatorial de Neptuno, al que circunvalan girando en sentido de rotación del planeta. En contraste, los planos orbitales de Tritón y Nereida están inclinados 20 y 30 grados respectivamente, y Tritón describe su órbita en sentido retrógrado, siendo la única luna del sistema solar que exhibe tal comportamiento. La fuerte inclinación de sus órbitas induce a pensar que estas lunas no se condensaron a partir de la misma materia que el planeta, sino que son cuerpos extraños que cayeron en el abrazo gravitatorio de Neptuno. Dale P. Cruikshank, del equipo de radiometría y espectrometría infrarroja, hizo notar que Tritón se parece mucho a un remoto asteroide llamado Quirón. "Nereida pudo haber sido prima de Quirón", dijo Cruikshank. "Estos pudieron ser los planetésimos a partir de los cuales evolucionaron los planetas."

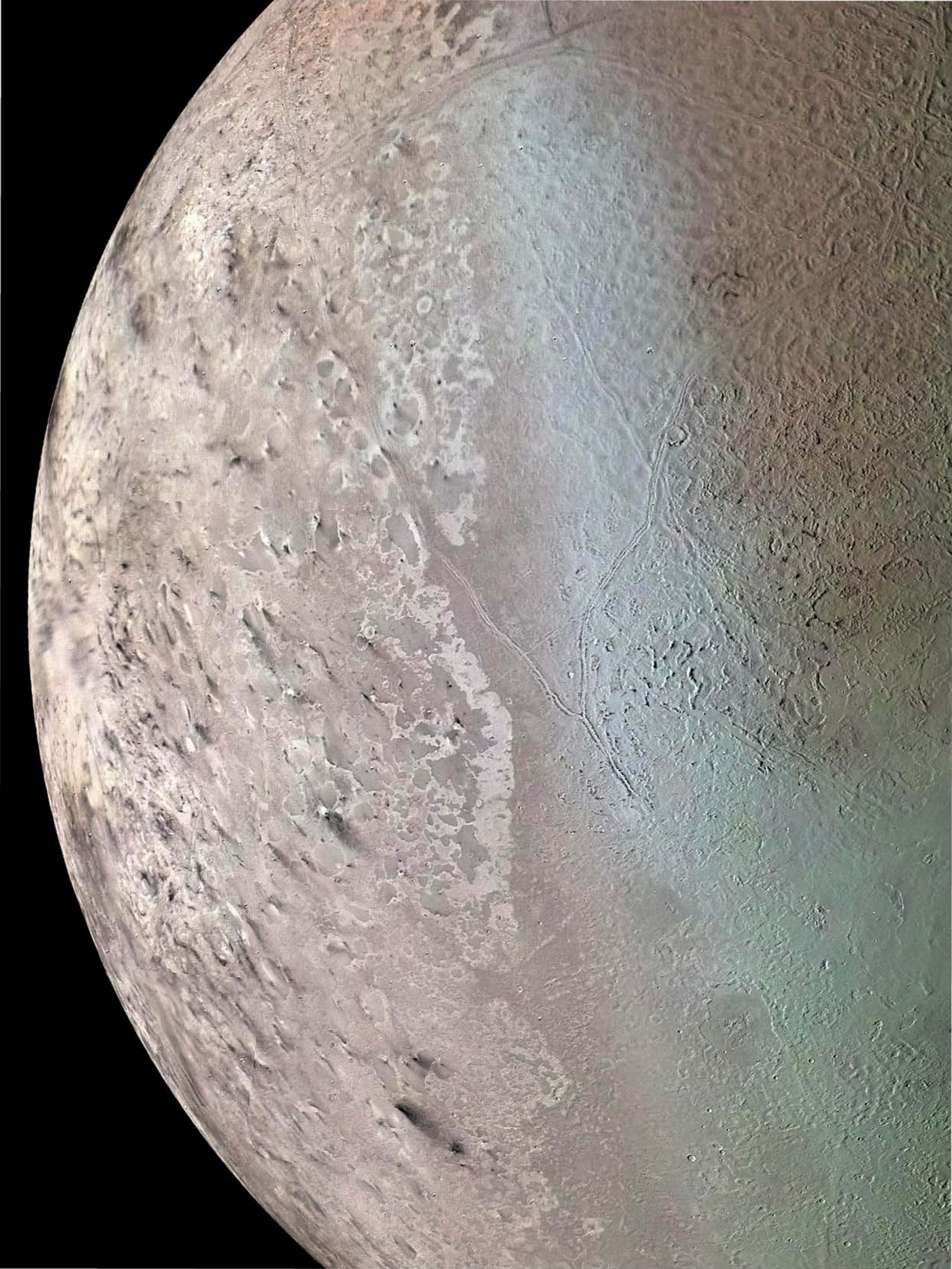
Si era poco lo que los científicos conocían sobre Neptuno antes de la pasada del *Voyager 2*, menos aún sabían de Tritón, la mayor de sus lunas. Como dijo uno de los investigadores de Tritón: "Sabíamos que se encontraba allí y conocíamos su nombre". Durante los días previos al encuentro, el *Voyager 2* transmitió sorprendentes instantáneas de Tritón: una bola rosácea, lacerada, sugeridora de un historial geológico espectacular. En la noche del 24 de agosto, los científicos se abastecieron de pinchos de tortilla y café para sostenerse hasta el amanecer, momento en que llegarían a la Tierra las fotografías de la máxima aproximación a Tritón. En la sala de prensa, los periodistas dormitaban sobre sus máquinas de escribir o contaban pasos frente a los monitores.

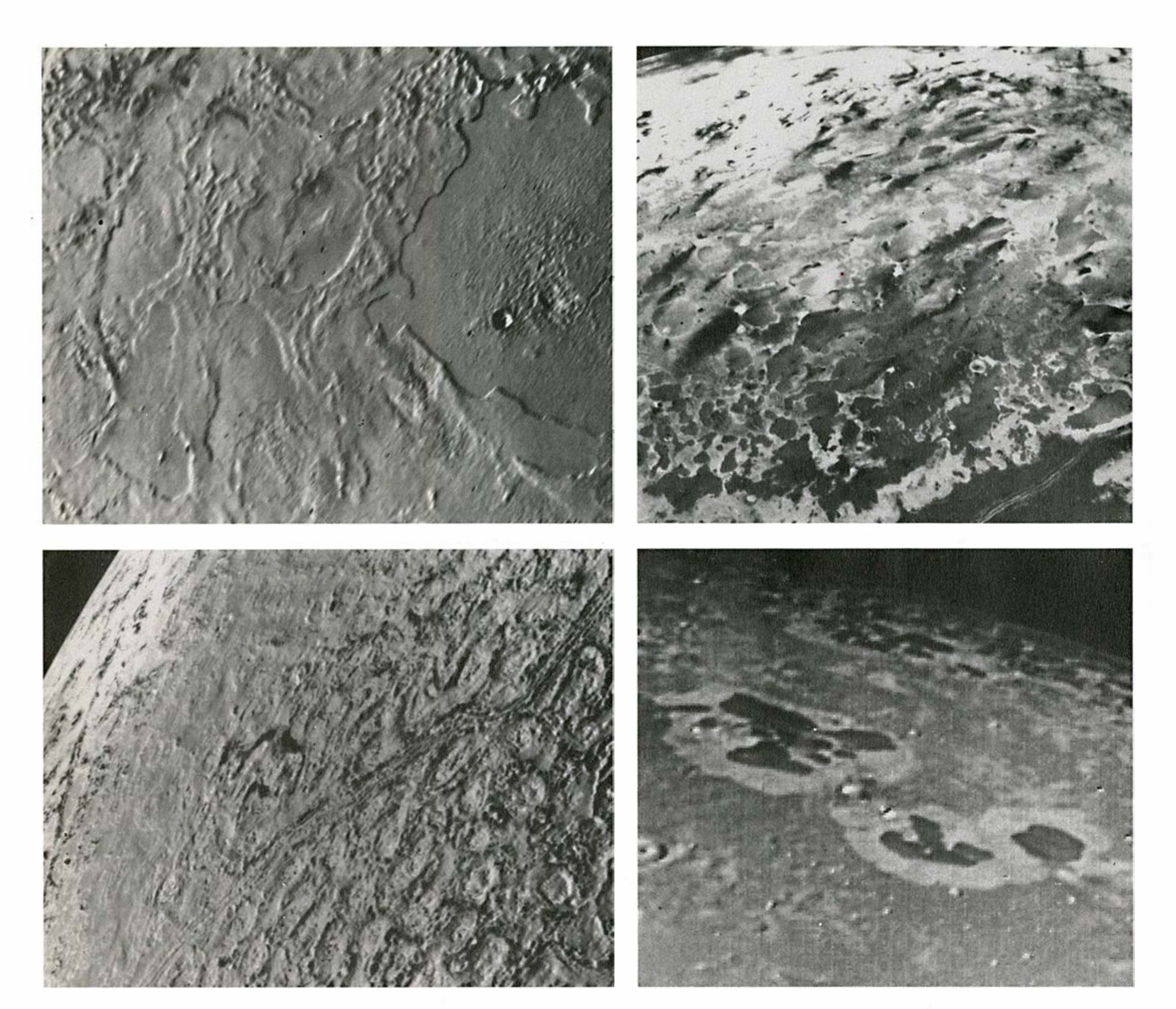
A las 3,40 de la mañana destellaron en las pantallas las primeras imágenes en blanco y negro. Todo el mundo se puso en pie y se apretujó sobre los monitores, exclamando y señalando aquellas imágenes tan increíblemente nítidas, que revelaban paisajes crenulados, inmensos cañones, cráteres y picachos. Cada nueva imagen era todavía más llamativa aún que la anterior. "Parecen callos", ofreció alguien. Otros propusieron "piel de melón" y "celulitis". Como diría Ed Stone, fatigado y feliz, casi al amanecer, "ha sido una noche de las que no se olvidan".

Tritón resultó poseer un diámetro de 2720 kilómetros, poco menos que la Luna terrestre. Hielos de metano y nitrógeno alcorzan su casquete polar, y es tanta la luz solar que este escarchado refleja, que la temperatura es tan sólo de 37 grados Kelvin, lo que hace de Tritón "el objeto más frío que hemos visto en el sistema solar", según Roger Yelle, del equipo de es-



5. ANILLOS COMPLETOS, visibles en un par de magníficas fotografías con iluminación de fondo. Hay dos anillos brillantes, uno interior, más débil, y una lámina difusa que puede descender hasta las nubes más altas de Neptuno. El planeta propiamente dicho quedó fuera de encuadre, lo que explica la banda negra central.





*6. "UN MUNDO SIN PAR", fue la descripción que dieron los científicos de Tritón, una luna de torturado paisaje (*página contigua*). El gran casquete polar meridional (*izquierda*) puede estar compuesto por una gélida costra de nitrógeno sólido que se evaporó y se depositó durante el último invierno, hace unos 80 años. La faz lunar está surcada de gigantescas fisuras. Los lagos helados (*arriba, izquierda*) pudieron haberse fundido por vulcanismo. Penachos de material oscuro sobre el escarchado polar pueden ser indicación de vulcanismo más reciente (*arriba, derecha*). Un terreno que recuerda la piel del melón de secano (*izquierda, abajo*) puede haber sido creado por fusión y deformación local de la superficie. Los parches oscuros contorneados por un festón brillante (*derecha, abajo*) tienen desconcertados a los científicos.*

pectrometría ultravioleta. Incluso así, la inclinación del eje de rotación y el sesgo de su plano orbital son responsables de variaciones estacionales. El casquete polar meridional, que en la actualidad se encuentra en la plenitud de su verano, que dura 41 años, se ha evaporado en muchos puntos de su contorno.

La atmósfera de Tritón se encuentra superlativamente enrarecida –es unas 100.000 veces menos densa que la terráquea– y se compone fundamentalmente de nitrógeno. Una vista amplificada del borde perfilado del satélite revela que la atmósfera, a pesar de ser tan tenue, es suficiente para sostener una neblina de diminutas partículas, que se eleva de cinco a diez kilómetros sobre la superficie. La temperatura de la atmósfera alcanza unos 100 grados Kelvin a la altura de 600 kilómetros. Los científicos afirman que el fenómeno no se asemeja a una inversión de temperatura en la atmósfera terrestre. En la atmósfera de Tritón, el calentamiento se produce a una altura mucho más elevada, y hasta ahora nadie comprende cuál podría ser la causa.

Mucha curiosidad atrajeron los borrones oscuros del casquete polar meridional de Tritón, manchones que hacían pensar en rastros dejados por el viento. Laurence A. Soderblom, del equipo de tratamiento de imágenes, provocó uno de los mayores revuelos del encuentro al sugerir que aquellos rastros estaban creados por erupciones volcánicas o por géiseres. Las temperaturas y presiones de las cercanías de la superficie de Tritón permitirían que cierta fuente calorífica interna elevase la presión del nitrógeno atrapado en la subsuperficie, hasta hacerlo explosionar, explicó So-



7. EN LA ULTIMA mirada del Voyager a Neptuno, la nave captó a Tritón en cuarto creciente sobre la panza del planeta. La imagen fue tomada tres días después de la aproximación máxima, cuando la sonda ya se hundía en dirección sur, hacia el exterior del sistema solar.

derblom. Al ser expelido el nitrógeno hacia la superficie, podría barrer consigo compuestos carbónicos de la corteza, más oscuros. El polvo pudo ser arrastrado a sotavento y quedar disperso sobre la superficie helada. Soderblom sugirió que tales erupciones podrían estarse produciendo por todo el satélite, y que es la gélida cubierta del terreno la responsable de que los penachos sean sólo visibles en el casquete polar meridional. Penachos similares de dióxido sulfuroso se han observado en Io, una de las lunas jovianas, hizo notar Soderblom. "Se trata de una idea muy osada, probablemente falsa, pero es la mejor que tenemos por el momento."

Justo al norte del casquete polar, yace un vasto trecho de crestas y depresiones circulares de tamaño sensiblemente uniforme, que a nada se asemeja tanto como a la piel de un melón de secano. "La zona ha sufrido fallas y se ha deformado un número indescriptible de veces", dijo Soderblom. La superficie presenta un número apreciablemente menor de cráteres que la región adyacente, indicio verosímil de que constituye el terreno más joven de la luna. La superficie se encuentra también acuchillada por fisuras que hacen pensar en autopistas ingentes, que se intersecan en X y en Y gigantescas. Parece como si un material viscoso, quién sabe si un aguanieve entreverado de amoníaco, hubiera forzado el paso hacia lo alto, infiltrándose en algunas de estas fisuras, formando crestas centrales y desbordándose, en ocasiones, sobre las llanuras circundantes.

Yacentes en este terreno se encuentran lagos helados contorneados por una serie de terrazas, como si el nivel de los lagos hubiera cambiado, a resultas de congelaciones y fusiones provocadas por el calor volcánico. Tales formaciones en terraza son corrientes en los volcanes hawaianos, dijo Soderblom. Los lagos de Tritón debieron, en tiempos, estar llenos de líquido de reducida viscosidad, porque su superficie helada es llana y nivelada. Empero, en forma helada, la sustancia tiene que ser de una rigidez extraordinaria para poder sostener terrazas cuya altura se mide en kilómetros. El metano, el nitrógeno y el carbono no son candidatos plausibles,

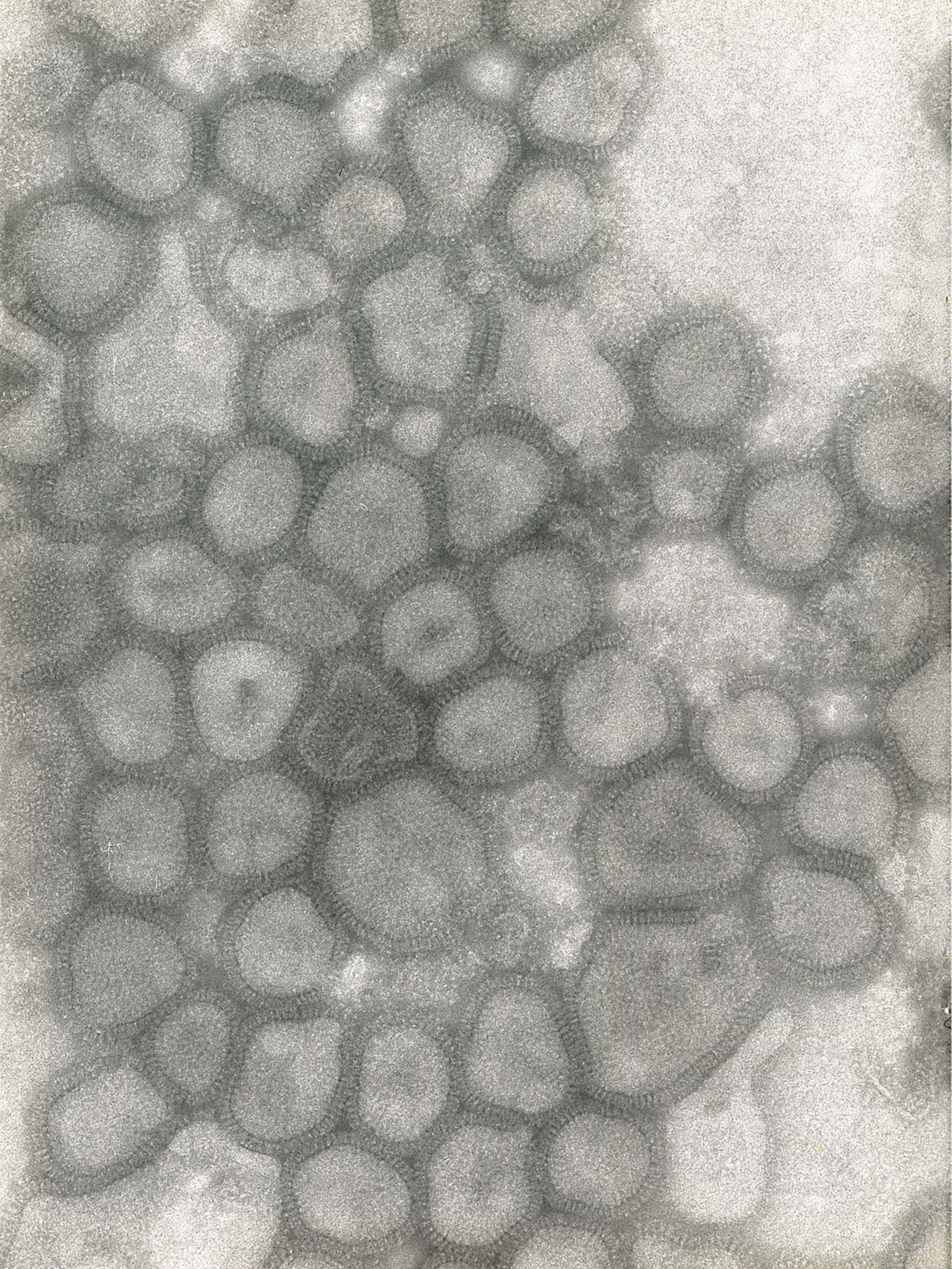
dijo Steven K. Croft, geólogo de la Universidad de Arizona, porque sus hielos fluirían como los glaciares. El agua helada, sin embargo, tiene la rigidez de la roca a las temperaturas que encontramos en Tritón y constituye, "casi con certeza", el material del que están formados los lagos.

Estos signos de pasado vulcanismo demuestran que Tritón fue, en tiempos, un lugar más cálido, presumiblemente, porque tuvo un origen muy poco frecuente. Tritón pudo haber sido un planeta independiente, bastante similar a Plutón, al que se asemeja en tamaño, y posiblemente en composición, pues contiene más roca que otros satélites helados. Más tarde, Tritón fue capturado por Neptuno; conforme se fue asentando gradualmente en su órbita circular presente, la fricción de las mareas pudo haber fundido al satélite y provocado el vulcanismo hasta hace cosa de mil o dos mil millones de años. "Es verosímil que estemos contemplando la huella congelada de aquella era anterior", dijo Stone.

El reconocimiento de Tritón por el Voyager puso punto final a una época extraordinaria de exploración planetaria. En los 12 años transcurridos desde que fueron lanzadas, las sondas Voyager han contribuido más a la comprensión de los planetas que los tres milenios de observaciones realizadas desde la Tierra. La ciencia dispone ahora de "nada menos que la enciclopedia de los planetas", afirmó Stone.

En la actualidad, el *Voyager 2* se dirige en dirección sur, saliendo del plano de los planetas en un ángulo de unos 50 grados. *Voyager 1* se desvió hacia el norte tras el encuentro con Saturno. Se espera que las fuentes energéticas de las naves, pilas atómicas de plutonio, empiecen a fallar hacia el año 2015. Los científicos esperan que, para entonces, los Voyager habrán alcanzado la heliopausa, el verdadero límite del sistema solar, donde el viento solar entra en colisión con el medio interestelar. Entonces proseguirán a la deriva, invisibles y silenciosos durante eones, testamento del espíritu inquisitivo de los humanos que los lanzaron.

JUNE KINOSHITA desempeña el cargo de coordinadora general de las distintas ediciones nacionales de *Scientific American*, a cuyo consejo de redacción pertenece. Agradece a Edward C. Stone, profesor de física del Instituto de Tecnología de California y jefe del proyecto de la misión Voyager, su colaboración en la redacción del artículo.



La gripe y sus virus

Las peculiaridades de los virus de la gripe garantizan su pervivencia tanto en el hombre como en algunos otros mamíferos y aves, ocasionando anualmente numerosas muertes y cuantiosas pérdidas económicas

José A. Cabezas y Claude Hannoun

Se ha calculado que la impropiamente denominada "gripe española" que azotó amplísimas zonas de todo el mundo cuando finalizaba la primera guerra mundial en 1918 (y durante el año siguiente), en tres oleadas sucesivas, ocasionó una cantidad de muertes superior a las provocadas por aquella conflagración.

En 1893, R. F. J. Pfeiffer, bacteriólogo alemán, creyó haber descubierto el agente responsable de la gripe: el *Haemophilus influenzae*. Después se supo que este cocobacilo gram-negativo es un acompañante frecuente, pero no el agente causal. El virus (o mejor dicho, los virus) fueron descubiertos por Dujarric de la Rivière, en 1918, en el Instituto Pasteur de París. Al mismo tiempo, en Túnez, Ch. Nicolle y Ch. Lebally provocaron gripe en monos mediante un filtrado procedente de mucosidades nasales de griposos. (Estos estudios lo que realmente demostraron fue la filtrabilidad del agente.) W. Smith, C. H. Andrewes y P. P. Laidlaw, de Gran Bretaña, lograron, en 1933, aislar el virus tipo *A* y ocasionaron en hurones esta enfermedad mediante inoculación por vía nasal. El cultivo del virus, de manera similar a como se sigue haciendo en nuestros días, en la membrana corioalantoidea del huevo fecundado, se introdujo en 1936 por F. M. Burnet en el Reino Unido. En 1940, en Nueva York, se descubrió el virus tipo *B*. Y en años sucesivos de esa década se observó el fenómeno de la hemaglutinación ocasionado por estos virus; se empezaron a usar las primeras vacunas; se estableció en Londres (1947) la oficina para estudios epidemiológicos y se descubrió el tipo *C* de virus de la gripe (no bien caracterizado hasta época reciente).

1. VIRIONES DE GRIPE DE TIPO A, extraídos de la especie humana y purificados en el Instituto Pasteur de París por Claude Hannoun y colaboradores. El examen mediante microscopía electrónica, a 200.000 aumentos, muestra predominantemente formas esferoidales, pero también aparecen algunas de tipo filiforme. Su tamaño es variable, oscilando frecuentemente entre los 100 y los 150 nanómetros. Se aprecian las espículas de la envoltura vírica, e incluso la unión entre algunos viriones mediante la hemaglutinina, componente de dicha envoltura. Los viriones extraídos de cerdo y aves presentan características muy similares.

Se cree que la elevada morbilidad (número proporcional de enfermos, en población y tiempo determinados), seguida de enorme mortalidad, de la pandemia de gripe de 1918-1919 se debió en gran parte a las deficiencias sanitarias propias de entonces, incrementadas por las dificultades derivadas del conflicto bélico. La pandemia de 1957, llamada "gripe asiática", y después la de 1968 ("gripe de Hong Kong"), aún más grave que la de 1957, cuyos virus se estima tenían una patogenicidad mayor que los de 1918-1919, ocasionaron daños bastante inferiores, probablemente gracias al mejor estado general de la población y al empleo de medidas sanitarias adecuadas.

Los virus de la gripe pertenecen a la familia de los ortomixovirus (*Orthomyxoviridae*); tienen la propiedad de unirse a las antes llamadas "mucinas" (glicoproteínas) de la membrana de las células. Examinados al microscopio electrónico presentan forma sensiblemente esférica, aunque a veces también muestren formas muy alargadas. Comprenden una envoltura provista de proyecciones (espículas) que son la hemaglutinina (HA) y la neuraminidasa o sialidasa (NA). Dicha envoltura consta de una bicapa lipídica, en la que se hallan introducidas parcialmente la HA y la NA. Debajo de la bicapa lipídica se encuentra la capa protídica, formada por la proteína M, que constituye la parte interna de la cubierta o envoltura vírica. El genoma consta de 8 segmentos de ARN, monocatenario, asociado a una proteína específica e inserto helicoidalmente en ella constituyendo la nucleocápsida.

Se consideran valores medios para los constituyentes a los siguientes: 70-75 por ciento de proteínas; 18-20 por ciento de lípidos; 2-8 por ciento de glúcidos y, aproximadamente, un 1 por ciento de ARN. Se distinguen varios tipos de proteínas; unas tienen función estructural, como la proteína M (que forma la matriz de la estructura), y otras son de carácter enzimático, como las polimerasas. Los lípidos presentan cierta variabilidad; proceden de la membrana de la célula hospedadora, que así los pierde. Se trata mayoritariamente de fosfolípidos, que constituyen la bicapa lipídica del virus, protegiéndolo además de la acción de proteasas. También proteínas de la célula hospedadora pueden quedar "empaquetadas" en el interior de los viriones

JOSE A. CABEZAS FERNANDEZ DEL CAMPO y CLAUDE HANNOUN vienen colaborando desde 1979, con sus respectivos equipos, en la investigación de la neuraminidasa del virus de la gripe. Cabezas es, desde hace veinte años, catedrático de bioquímica en Salamanca, de cuya universidad ha sido vicerrector de investigación. Otras glicosidasas (de origen lisosómico), gangliósidos y fosfolípidos de membranas son temas sobre los que, con sus colaboradores, viene también investigando en coordinación con prestigiosos centros de otros países europeos. Hannoun, doctor en ciencias, es profesor del Instituto Pasteur de París, director del Centro Nacional de la Gripe y jefe de la Unidad de Ecología Vírica de dicho Instituto, así como vicepresidente de la Sociedad Francesa de Microbiología. Ha orientado preferentemente sus investigaciones al estudio de los arbovirus y los virus de la gripe, habiendo desarrollado redes de alerta para la detección de epidemias de gripe y el control de ésta (mediante vacunas y agentes antivíricos). Tanto Hannoun como Cabezas son miembros de varias sociedades internacionales y han recibido distinciones de Academias por sus trabajos.

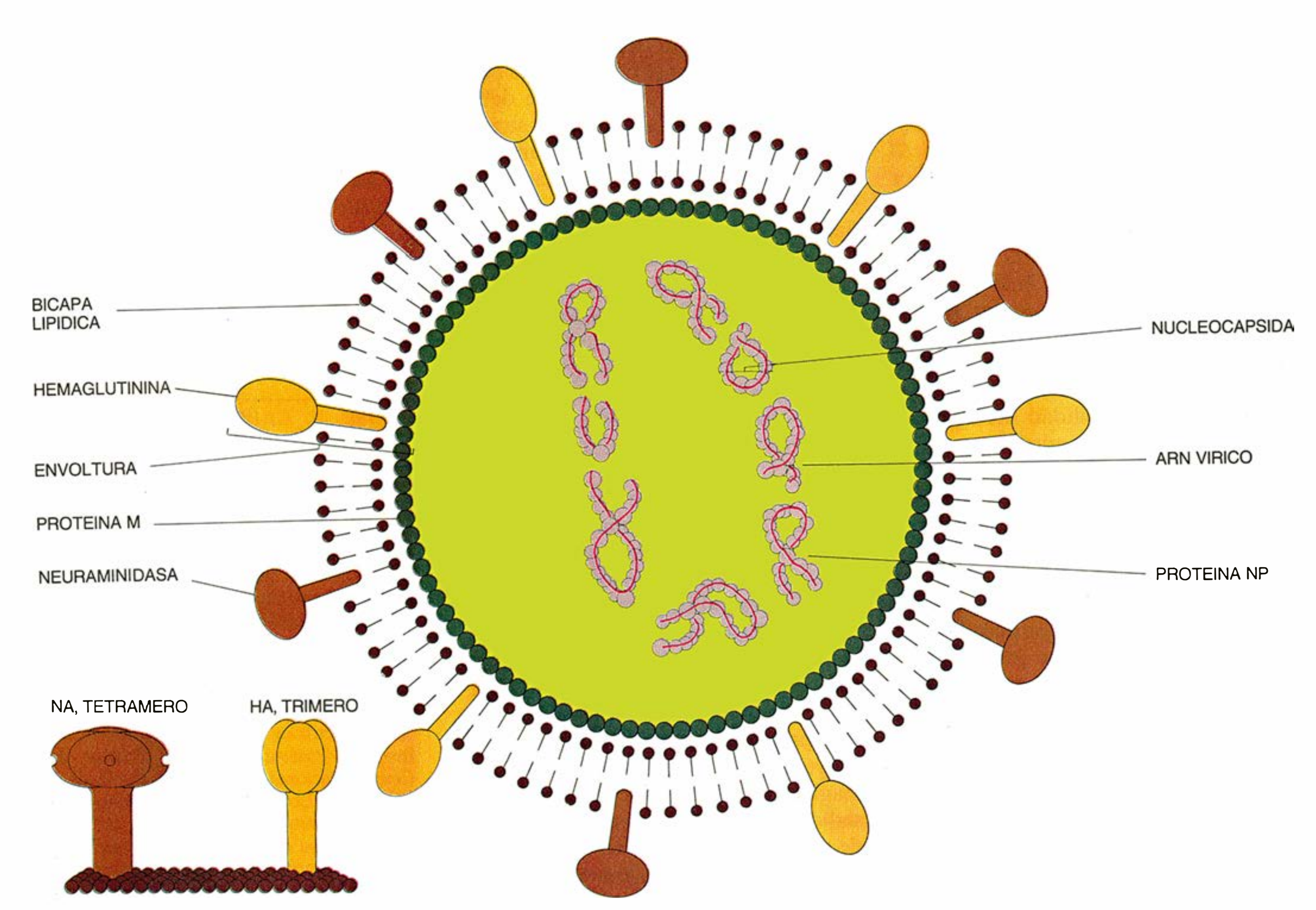
o permanecer fijadas en la superficie de éstos, como consecuencia de procesos de maduración por gemación.

Los virus de la gripe aglutinan los hematíes a través de una glicoproteína, la hemaglutinina (HA), de forma alargada; se halla constituida por un trímero, cada uno de cuyos tres monómeros termina en una parte redondeada. Su poder inmunógeno (capacidad de provocar la formación de anticuerpos) es muy superior al de la neuraminidasa. La hemaglutinina se halla distribuida uniformemente en la cubierta vírica, a diferencia de la neuraminidasa (que lo está en forma irregular, "arracimada"), y en número superior de moléculas.

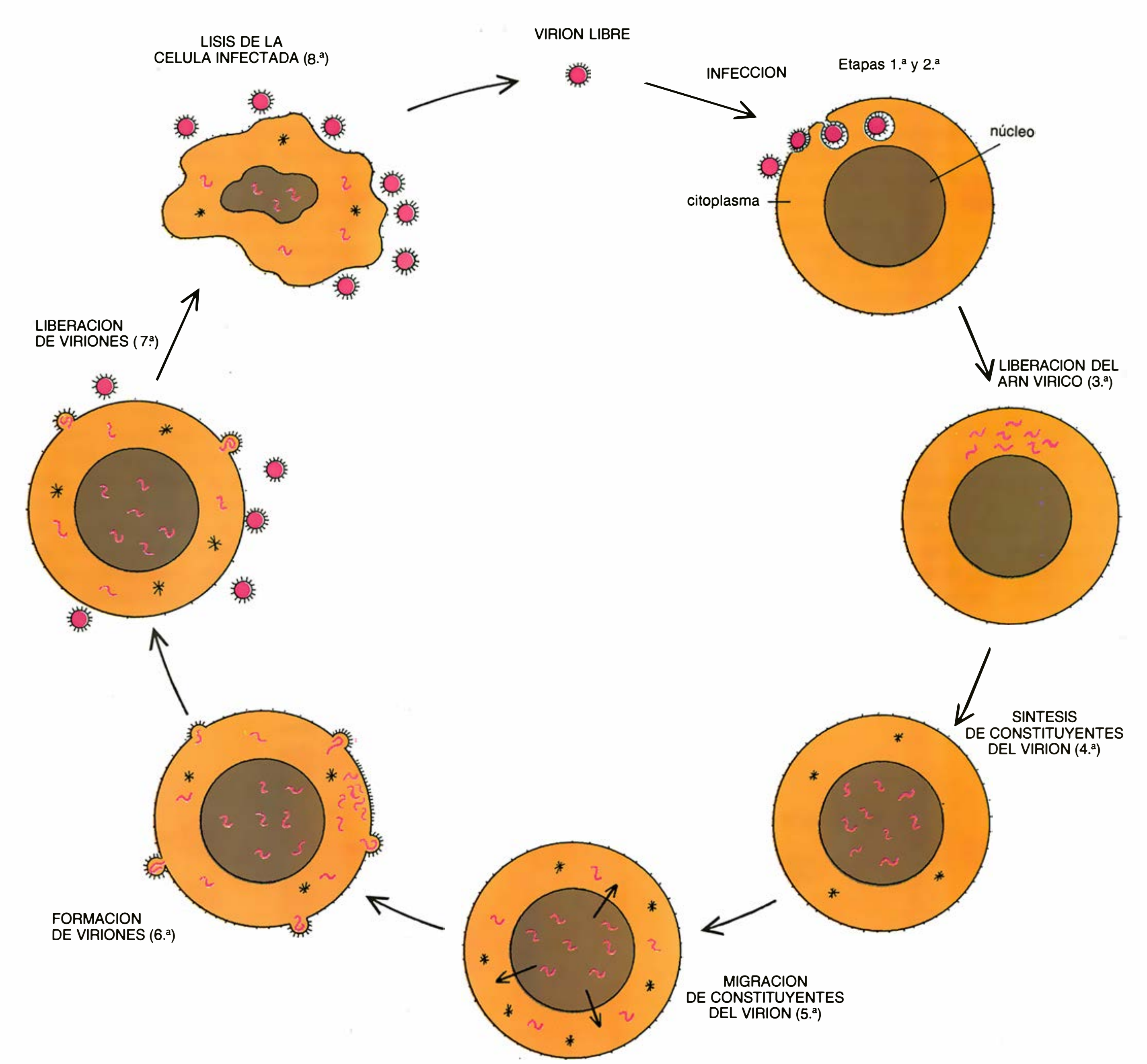
Por su parte, la neuraminidasa o sialidasa es una enzima de la clase de las hidrolasas que libera restos de ácidos siálicos, unidos a otra molécula glucídica o no glucídica. Fue Hirst, en 1942, quien descubrió que los virus de la gripe ocasionaban la aglomeración de los hematíes (hemaglutinación); este fenómeno desaparecía por la intervención de una "enzima destructora de los receptores" que existiría en dichos virus. La demostración de que eran ácidos siálicos las moléculas liberadas se logró hacia 1955 por E. Klenk y H. Faillard, de la Universidad de Colonia, y por A. Gottschalk, de la de Camberra. Tal hallazgo constituyó un hito en la historia de la virología, que desde entonces no pudo seguir sosteniendo la idea de que la ausencia de enzimas era una característica de los virus. Por otro lado, la amplia distribución de esta enzima, hallada en algunos paramixovirus (asociada a la hemaglutinina), en algunas bacterias y protozoos y en numerosos órganos de mamíferos, y su diversa especificidad (respecto a sustratos de tipo oligosacarídico/glicoproteínico, sialoglicolipídico o artificiales) hacen que las investigaciones sobre ella sigan siendo de gran interés.

Concretamente, los trabajos efectuados en la Universidad de Salamanca, en colaboración con el Instituto Pasteur de París, por los autores (auxiliados también por E. Villar, A. García-Sastre y B. Fiszon), demuestran que existen diferencias considerables en la actividad de la sialidasa de virus (aislados de seres humanos) de tipo A y la del B; y, a su vez, entre ésta (de ambos tipos) y la procedente de cerdos y aves migratorias, como el pato salvaje. La incidencia de estas características cinéticas distintas, en la propagación del virus de la gripe, es objeto de estudio actualmente.

La nucleocápsida (formada por las nucleoproteínas y el ARN) y la proteína M son antígenos internos que permiten distinguir tres tipos de virus de la gripe: A, B y C. Los antígenos de su-



2. ESTRUCTURA DEL VIRUS DE LA GRIPE TIPO A, con indicación de sus componentes mejor conocidos. Los segmentos de ARN números 1, 2 y 3 se hallan muy relacionados con transcriptasas (proteínas de carácter enzimático). El número 4 codifica la biosíntesis de la hemaglutinina (HA); el número 5, la de la nucleoproteína integrante de la nuclecápsida; el número 6, la neuraminidasa (NA); el número 7, la de las proteínas M, componentes de la matriz de la envoltura, y el número 8, la de las proteínas no estructurales, NS1 y NS2. Las actividades de la HA y de la NA radica en los "cráteres" o cavidades de sus cabezas. El monómero de la HA puede efectuar la "fusión" del virus con la membrana de la célula hospedadora. Para la NA sólo el tetrámero es la forma activa, cuya función principal estriba en la liberación de los viriones recién formados, evitando su acumulación. Se conocen, en total, 13 subtipos de HA, que se designan como H1, H2, etc.; y 9 de NA, denominados N1, N2, etcétera. HA y NA son glicoproteínas; su porción glucídica da estabilidad a las estructuras terciaria y cuaternaria o evita el reconocimiento inmunitario de la molécula, o ambos, al menos en el caso de la NA.



3. ETAPAS DEL CICLO BIOLOGICO. Corresponde la primera a la fijación del virus, mediante su hemaglutinina, a la superficie de la célula hospedadora (por los receptores de ésta, ricos en ácidos siálicos: glicoproteínas y gangliósidos). En la segunda, se produce la penetración del virus entero, por endocitosis (a diferencia de lo que sucede con algunos paramixovirus), y se forman endosomas (vesículas endocíticas prelisosómicas) que envuelven al virus manteniéndolo a un *p*H de 4,5; este *p*H ácido ocasiona un cambio conformacional del fragmento HA2 de la hemaglutinina escindida, lo que favorece la "fusión" (o quizá la "disolución") de la envoltura vírica con la bicapa lipídica de la célula, precisamente a causa de la hidrofobicidad de la HA2. Viene luego la liberación del ARN vírico dentro de la célula ("descapsidación"), en virtud de la cual se separa el ARN de las nucleoproteínas con las que se halla integrado en la nucleocápsida. Las restantes etapas corresponden a biosíntesis de constituyentes de futuros viriones, migración de esos constituyentes hacia zonas periféricas, formación y, finalmente, liberación de los viriones por la NA, que contribuye de esta forma a la propagación del virus.

perficie (HA y NA) definen los subtipos propios del tipo A. El tipo A es el más importante y generalmente peligroso desde el punto de vista epidemiológico, siguiéndole el B. Este frecuentemente acompaña al A y suele ser menos peligroso; en él no se han encontrado subtipos y su actividad sialidásica es menor que en el A. En cuanto al C, se observó que tenía relación con la presencia de ácidos siálicos en la célula hospedadora; pero carecía de actividad sialidásica. Enigmas como el de la existencia a veces en viriones de este tipo C (crecidos en condiciones especiales) de ácidos siálicos o el de la actividad de viriones tipo C sobre algunos ácidos siálicos han sido esclarecidos muy recientemente, sobre todo merced a los trabajos de G. Herrler, H. D. Klenk y R. Schauer, quienes han demostrado que la actividad enzimática no corresponde a la de la neuraminidasa sino a la de una *O*-acetilesterasa, que libera restos *O*-acetilo preferentemente de la posición 9, terminal, de algunos ácidos siálicos. En 1988, Klenk y colaboradores señalaron que esta glicoproteína del tipo C era, al mismo tiempo, hemaglutinina, esterasa y factor de fusión.

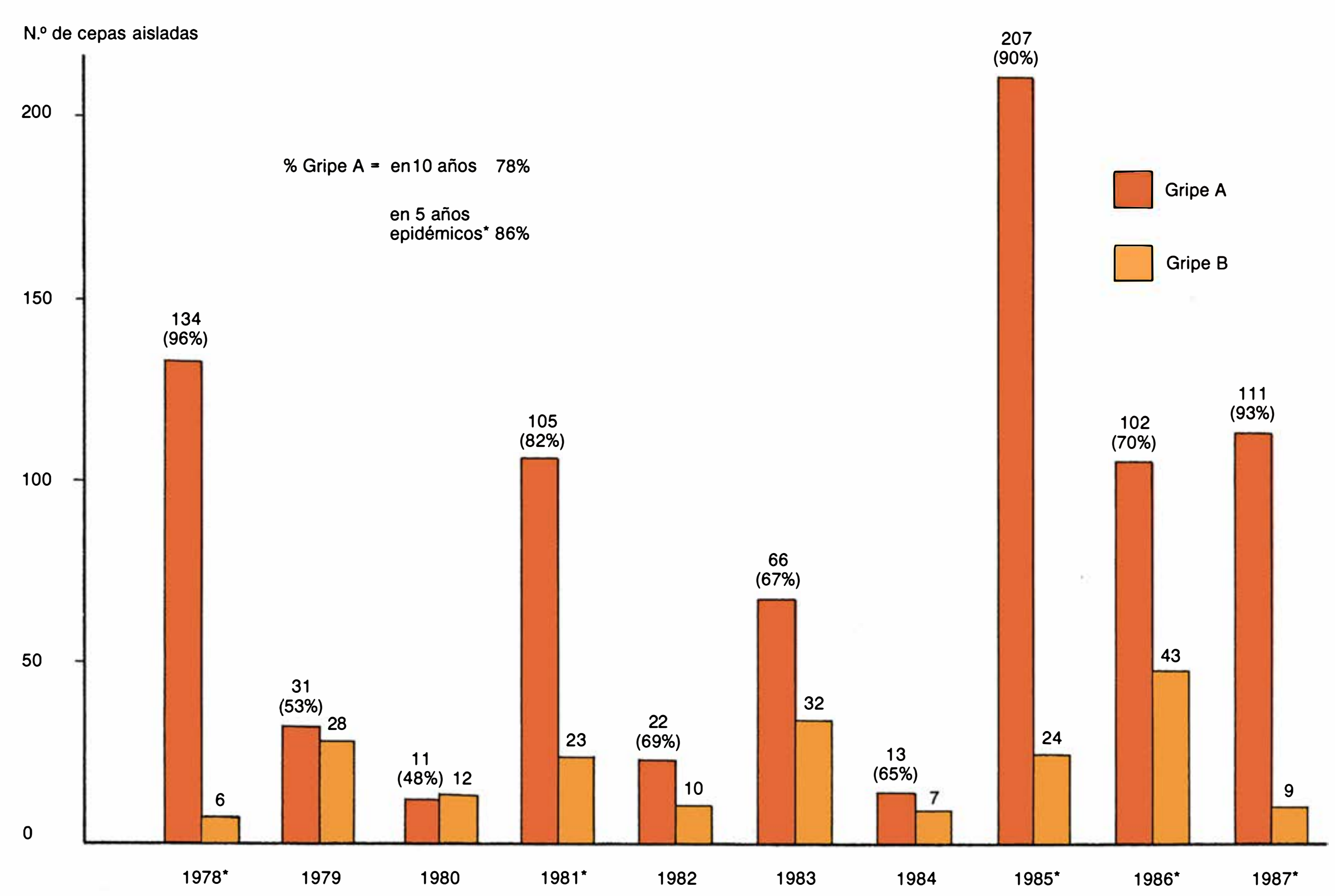
En el ciclo del virus de la gripe se distinguen dos fases: la que transcurre sin vinculación ninguna con la célula y la que tiene lugar en conexión

con dicha célula hospedadora. La “expresión” del virus sólo acontece en esta fase intracelular, si bien el virus no actúa como una entidad independiente, sino alterando el funcionamiento normal de tal célula en beneficio propio. Comoquiera que el virus en la fase extracelular únicamente pervive (sometido a circunstancias del medio, como cambios de *p*H o radiaciones, que incluso pueden destruirlo), se deduce que su multiplicación depende de las interacciones virus-célula hospedadora, en esa fase intracelular.

El ciclo biológico comienza con la fijación del virus a la célula; sigue con la penetración en la misma, la liberación del ARN vírico dentro de la célula y, después, la utilización de mecanismos de la célula en beneficio de la multiplicación propia: transcripción del ARN vírico en ARN mensajero (ARNm), traducción del ARNm en proteínas víricas y biosíntesis de ARN complementario (ARNc) positivo, por replicación. El ARNc servirá para la biosíntesis de nuevas moléculas de ARN negativo que formarán parte de los futuros viriones.

Hay que añadir tres etapas más: las moléculas de HA y NA, formadas en el retículo endoplásmico y transportadas a través del aparato de Golgi, se fijan en la parte externa de la célula hospedadora; tiene lugar el ensamblaje o acoplamiento cerca de esa zona de todos los componentes víricos, de modo que las nucleoproteínas envuelven helicoidalmente a los ARN negativos para formar la nucleocápsida. Todo ello queda rodeado por la proteína M, y se incorporan a su alrededor los lípidos de la membrana de la célula hospedadora. Provisto de esa envoltura, el virión recién formado, momentáneamente retenido sobre la superficie externa de la célula, se libera de ella. Dicha célula queda seriamente dañada.

Esa sucesión de pasos presenta puntos oscuros. Por ejemplo, al ser negativo el ARN vírico no puede actuar como ARN mensajero. Necesita ser transcrito; pero careciendo el virus de capacidad para iniciar esta biosíntesis de ARNm, parece ser que debe intervenir, además de la polimerasa del propio virus, otra polimerasa celular para cebar el comienzo del proceso y la metilación del extremo llamado 5′. Para la biosíntesis de las proteínas víricas se utilizan los polirribosomas de la célula hospedadora. De todos modos, transcripción del ARN vírico en ARNm y replicación del virus son aspectos del ciclo biológico del virus cuyo mecanismo de regulación no se conoce con exactitud; pero se cree que puede utilizar las mismas proteínas: la concentración crítica de éstas determinaría el punto del equilibrio entre replicación y transcripción. Lo que sí está comprobado es que la única clase de ARN no encapsidado es el ARNm, que actúa como molde para la biosíntesis de las proteínas víricas. Inversamente, los ARN encapsidados son los únicos que sirven como molde para la biosíntesis del ARN vírico; dichos procesos de replicación y transcripción acontecen en el núcleo celular.

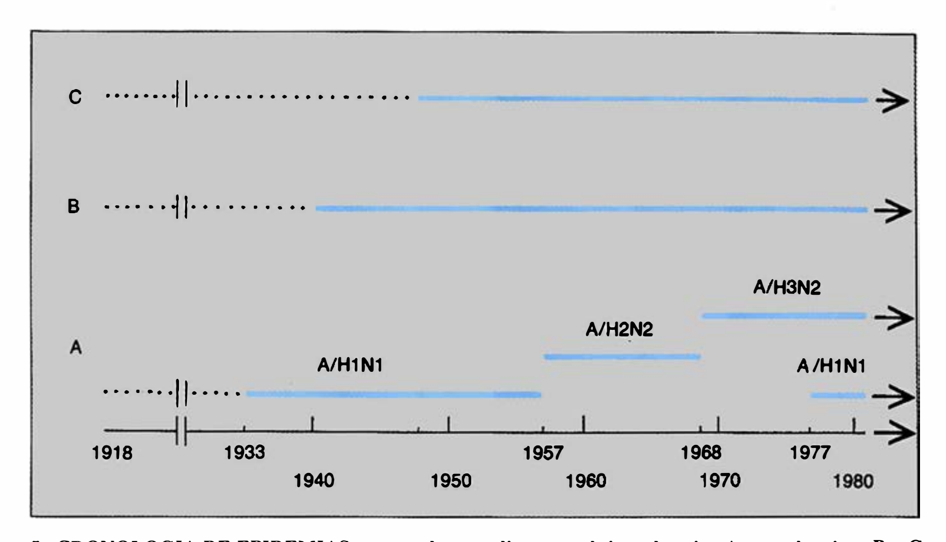


4. NUMERO Y PORCENTAJE de cepas de virus de la gripe (tipos A y B), aisladas e identificadas en el Groupe Regional d’Observation de la Grippe (GROG), con sede en el Instituto Pasteur de París, que coordina los datos de la mitad norte de Francia, correspondientes al período de 1978 a 1987. Obsérvese, en primer lugar, el predominio de virus de tipo A. Excepcionalmente, en el segundo semestre de 1988 se halló que el porcentaje mayor era el del tipo B (datos no indicados). Cabe destacar también la variabilidad de dichos porcentajes según los años, así como la proporción aún más elevada para el tipo A coincidente con los años considerados epidémicos (1978, 1981, 1985, 1986 y 1987). La caracterización temprana de los subtipos A y del tipo B en circulación en cada temporada es primordial para la preparación de las vacunas; los datos suministrados por las redes de alerta son muy útiles.

La existencia de ocho fragmentos en este genoma vírico facilita la redistribución de genes por mecanismos que más que de recombinación (unión de una cadena con otra) son de reagrupamiento de segmentos genómicos, fenómeno comprobado experimentalmente y que incide en la aparición de nuevas cepas del virus tipo A.

La presión inmunológica por parte de los hospedadores determina cambios menores en el mecanismo defensivo del virus, logrando éste, así, su pervivencia. Tales cambios tienen lugar mediante mutaciones puntuales. Pero agotadas estas posibilidades, al cabo de algunos años en la especie humana (10-20 años, aproximadamente) se producen cambios mucho más intensos. Además, hasta que no desaparecen por fallecimiento (después de unos 70 años) las personas inmunizadas en una gran epidemia o pandemia no es previsible encontrar subtipos de virus anteriores; pero sí después de ese período. Ello explicaría las similitudes que se estima han podido existir entre los virus de 1889 y los de 1957, y entre los de 1898-1900 y los de 1968. Todas estas alteraciones en el genoma, dada la versatilidad conferida por los ocho segmentos de ARN, tienen su repercusión en proteínas internas, y en externas como la HA y la NA, cuyas características estructurales se modifican con alteraciones más o menos profundas en sus actividades. En el caso de la NA de virus A se han hallado alteraciones en las proximidades del sitio activo. La estructura de la NA de los virus tipo B se conoce menos. Estos virus no experimentarían cambios bruscos como los A, aunque sí deriva.

Aparte de estos mecanismos que favorecen la pervivencia del virus de la gripe y dificultan su erradicación, este virus dispone para su continuidad de reservorios distintos de los humanos: especies como el cerdo (cuya vida media de pocos años garantiza al virus la desaparición en corto plazo de los animales inmunizados, al nacer otros desprovistos de defensas) y las aves.



5. CRONOLOGIA DE EPIDEMIAS provocadas por diversos subtipos de gripe A y por los tipos B y C. Las líneas en azul, continuas, señalan los períodos de pervivencia de los tipos/subtipos indicados, correspondientes a datos obtenidos después de una caracterización de los antígenos víricos. Las líneas de puntos manifiestan que los virus no han sido conservados, y que los datos de su actividad son solamente indirectos. Un caso especial ha sido el de la reaparición del subtipo H1N1, que no estaba en circulación entre los humanos en 1976, pero sí en el cerdo, y que perdura en nuestros días. Asimismo, se considera que la pandemia de gripe de 1918-19 pudo tener su origen a partir de variantes existentes en el cerdo. También las aves, tanto domésticas (pavos y otros) como las salvajes (especialmente patos), pueden contribuir a la aparición de nuevos subtipos o variantes, favorecidos los intercambios en este caso en los sitios de confluencia de las migraciones. El subtipo H2N2 desapareció en 1968, al aparecer el H3N2.

La vacunación es un instrumento particularmente útil –aunque con ciertos riesgos, mínimos actualmente– para provocar de manera activa la formación de anticuerpos frente a numerosos gérmenes (virus, bacterias). Es bien conocido que en el caso de la gripe las variaciones frecuentes de los virus obligan a una vacunación anual, casi siempre recomendada en otoño antes de la época peligrosa, e indicada sobre todo para ancianos (personas con menor capacidad de respuesta inmunitaria, que sufren otras infecciones) y para otras personas de alto o medio riesgo (que pueden padecer contagios fácilmente).

Si bien este poder inmunógeno suele ser elevado en las vacunas que utilizan virus gripales vivos (más o menos atenuados) –y que además son más baratas que las inactivadas–, existe el riesgo de la activación de éstos una vez introducidos en el ser humano; por lo que en la actualidad aquéllas apenas se emplean. El riesgo de activación, aunque menor, también existe en las vacunas con virus inactivados, dada la posibilidad de que persista vivo algún virión.

Teniendo en cuenta que con las vacunas de virus enteros (atenuados o inactivados) se introducen en el ser humano componentes antigénicos perjudiciales, no dotados de actividad protectora frente a la gripe –pudiendo llegarse también a introducir proteínas del medio de cultivo, como las del huevo de la gallina–, se pensó si podría lograrse el efecto inmunógeno empleando fragmentos de virus o incluso solamente componentes de la superficie vírica (HA, NA o ambos), evitándose esos inconvenientes que entrañan riesgos. En efecto, el resultado ha confirmado la hipótesis. Así, existen vacunas con fragmentos de virus o con las citadas glicoproteínas. Ahora bien, con estas últimas la respuesta inmunógena es menor que si se hubieran usado virus completos. Ello ha tratado de ser compensado mediante el uso de los llamados adyuvantes (sustancias de índole varia, desde óxido de alúmina a emulsiones de aceite mineral y agua o constituyentes de micobacterias muertas, algunos de ellos empíricamente usados desde los primeros tiempos de la virología). De todos modos, el empleo de ciertos adyuvantes, especialmente los últimos citados, también tiene sus inconvenientes, al ocasionar inflamación. Por ello, se sigue prefiriendo en general el uso de vacunas con gérmenes enteros (inactivados) o fraccionados.

Otra posibilidad correspondería al grupo que podría denominarse de vacunas nuevas. Así, mediante síntesis en el laboratorio, se ha logrado fabricar péptidos cuya secuencia corresponde esencialmente a la porción más activa en la producción de anticuerpos; por ejemplo, la sección correspondiente a los aminoácidos números 91 a 108 de la HA. No hay que olvidar, sin embargo, que los sitios antigénicos pueden corresponder a fragmentos que contienen aminoácidos contiguos en una secuencia lineal o a aquellos que, no hallándose así, lo están sólo en la conformación de la proteína. En teoría, mediante esta modalidad, además de conseguir una potencia inmunógena elevada, se evita la introducción de componentes indeseados. Además, pueden incorporarse a estructuras artificiales como

son los liposomas. Por todo ello, se considera ésta como una de las vías más prometedoras, máxime dada la posibilidad de incorporar diversos fragmentos pertenecientes a varias vacunas.

Ultimamente se viene también trabajando en la obtención de vacunas mediante la técnica del ADN recombinante, a veces usando virus de la viruela, para obtener una vacuna múltiple que incorporaría genes procedentes de virus de la gripe, de la hepatitis B y del herpes.

Mediante recombinación genética se pueden obtener virus híbridos; por ejemplo, los genes de la HA y de la NA de un virus humano interesantes desde el punto de vista epidemiológico y los restantes genes procedentes de un virus animal carente de peligro para el hombre. Pero también aquí aparece el problema de la estabilidad de las cepas, una vez sufridos varios pases por parte de esos virus en seres humanos. Otra posibilidad es la de conseguir virus a los que se les prive de los genes causantes de su patogenicidad, dejando sólo los que originen inmunogenicidad en el hombre. Serían verdaderos virus "quimera" especialmente destinados a actuar como vacunas, ya que contendrían el patrimonio genético responsable de la biosíntesis del antígeno dotado de la acción inmunógena.

Se considera que, después de la primera generación de vacunas antigripales, comenzadas a preparar con cierto empirismo hace varias décadas, nos hallamos actualmente en la segunda generación. Además de las vacunas antigripales, y totalmente compatibles con ellas, desde hace sólo muy pocos años se han autorizado oficialmente en algunos países fármacos como la amantadina y, más recientemente, la rimantadina, con la doble finalidad de agentes preventivos y quimioterápicos. Este hecho abre nuevos horizontes. Téngase presente que la amantadina se conoce como preventivo para la gripe desde hace un cuarto de siglo.

La estructura química de estos compuestos, de gran estabilidad química, como derivados que son del adamantano, recuerda una jaula de pájaros. Son dos aminas tricíclicas, estrechamente emparentadas entre sí, obtenidas por síntesis, que se presentan como un polvo cristalino blanco, soluble en agua y etanol, y bastante estables al calor, la luz, los oxidantes y los cambios de *p*H.

Se pensó inicialmente que la amantadina actuaría impidiendo la penetración de los virus en la célula hospedadora. Esta hipótesis se amplió en 1984 admitiendo que la rimantadina, al actuar sobre los receptores de la membrana de la célula hospedadora, impediría la endocitosis del virus. Actualmente, sin haber descartado por completo esta posibilidad, se estima como mucho más importante otra, no incompatible con la anterior, según la cual habiendo penetrado el virus en el interior de dicha célula se impediría la descapsidación del ARN vírico, y, por tanto, todos los procesos derivados de esa etapa.

Sólo en un medio suficientemente ácido, propio del contenido de endosomas y lisosomas, tiene lugar la "fusión" entre algunos constituyentes de la envoltura vírica y los de la membrana de los endosomas o de los lisosomas. (A su vez, la renovación de los constituyentes de la propia membrana citoplasmática se halla coordinada con la actividad de los lisosomas.) Si el *p*H de los lisosomas se eleva desde valores ácidos a otros cercanos a la neutralidad por la presencia de sustancias alcalinas que han penetrado en la célula incluso a concentraciones bajas, este efecto de "fusión" queda inhibido. Aminas como la amantadina y la rimantadina actuarían muy probablemente de este modo. En el caso de otros agentes alcalinos, como la cloroquina, la quinina, la atropina y otros compuestos básicos, se produce un hinchamiento notable del lisosoma, cuyo contenido pasa de un

6. ESTRUCTURA QUIMICA de la amantadina (*arriba*), clorhidrato de rimantadina (*izquierda, abajo*) y ribavirina (*derecha, abajo*). La amantadina fue estudiada, ya en 1963, en voluntarios. Se admitió su uso por la Oficina federal para la administración de fármacos de los EE.UU. como preventivo contra la gripe en 1966, organismo que la aceptó como agente quimioterápico también, en 1976, después de recoger la experiencia favorable en varios países europeos. Aun cuando sólo es eficaz sobre el virus de tipo A, se estima que puede reducir las infecciones de gripe en un 35-50 por ciento y los trastornos clínicos en un 50-70 por ciento. Más eficaz, y menos potencialmente tóxica que ella, es la rimantadina, cuyas dosis recomendadas son las de 200 miligramos por día, durante 6 días, compatibles con la vacunación. El uso de la ribavirina, por el contrario, presenta riesgos, como sucede con otros derivados nucleosídicos.

pH 4,5 a 6,5. Puede haber diferencias, no obstante, entre unos y otros agentes. Así, los efectos perjudiciales mencionados no han sido apreciados después del uso de la amantadina y la rimantadina; es más, hay diferencias entre las actividades y toxicidades respectivas de estos dos compuestos, a pesar de su gran similitud estructural.

La carboxamida del ribofuranosiltriazol (ribavirina), por bloqueo de la biosíntesis del guanosín-5′-monofosfato y, por ello, de las del ARN y ADN, se considera como agente antigripal, no sólo frente al tipo A del virus sino también al B. Ahora bien, es activa en forma de aerosoles, pero no por vía oral.

A la vista de todo lo anterior, cabe hacerse las siguientes preguntas finales: ¿se podrá erradicar mediante estos medios la gripe en plazo inmediato?, ¿serán muy mortíferas sus futuras epidemias/pandemias? Resulta aventurado contestar de una forma absoluta. Sin embargo, se puede pensar que no será fácil esta erradicación, dadas las peculiaridades genéticas de los virus de la gripe y la gran movilidad de poblaciones entre zonas incluso alejadas, donde perdura la gripe más fácilmente. Sin embargo, las temidas pandemias y las epidemias que solapadamente siguen causando víctimas entre los sectores de población más indefensos es casi seguro que no tendrán en el futuro la amplitud y repercusión que tuvieron en épocas no muy lejanas, por disponerse actualmente de agentes eficaces contra la gripe y existir redes de alerta internacionales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RAPPEL DE LA STRUCTURE DES VIRUS GRIPPAUX. POSSIBILITÉS D'ECHANGES INTERSPECIFIQUES. C. Hannoun en *La Grippe (Collection Fondation Merieux)*, págs. 9-16; 1983.

STRUCTURE OF THE CATALYTIC AND ANTIGENIC SITES IN INFLUENZA VIRUS NEURAMINIDASE. P. M. Colman, H. N. Varghese y W. G. Laver en *Nature*, vol. 303, n.º 5912, págs. 41-44; 1983.

LES VACCINS CONTRE LA GRIPPE. C. Hannoun en *Ann. Inst. Pasteur/Virol.*, vol. 136E, págs. 553-559; 1985.

THE STRUCTURE AND FUNCTION OF THE HEMAGGLUTININ MEMBRANE GLYCOPROTEIN OF INFLUENZA VIRUS. D. C. Wiley y J. J. Skehel en *Ann. Rev. Biochem.*, vol. 56, págs. 365-397; 1987.

PREVENTION, MANAGEMENT, AND CONTROL OF INFLUENZA. S. R. Mostow en *Am. J. Medic.*, vol. 82, págs. 35-41; 1987.

ANTIVIRAL DRUGS: PHARMACOKINETICS; ADVERSE EFFECTS, AND THERAPEUTIC USE. M. C. Nahata en *J. Pharm. Technol.*; págs. 100-108; mayo-junio de 1987.

La carretera más antigua del mundo

Es la pista de Sweet en Inglaterra, una calzada de madera de 6000 años de antigüedad, descubierta en una turbera. La madera, magníficamente conservada, proporciona numerosos datos acerca de sus constructores

John M. Coles

Un día de 1970, Raymond Sweet, extractor de turba, se ocupaba de su habitual tarea de los inviernos: limpiar la broza de las zanjas de drenaje que surcan las anchas turberas de los llanos de Somerset Levels, planicies del sudoeste de Inglaterra. Mientras cavaba, su pala dio contra un objeto duro. La turba es una substancia vegetal muerta y está blanda; por tanto, la resistencia significaba que algún objeto distinto de la turba, una raíz tal vez, se encontraba allí. Pero no se trataba de ninguna raíz, sino de una tabla de madera dura.

Sweet sospechó que la madera era antigua, pues estaba sepultada cerca del fondo de lo que antaño habían sido muchos metros de turba, depositados durante miles de años. Hizo entrega de un fragmento a la compañía concesionaria de la turba, la Eclipse Peat Works, que, a su vez, me lo envió a la Universidad de Cambridge. Yo había realizado trabajos arqueológicos en esos llanos durante varios años y mi interés por la madera antigua era bien conocido entre los extractores de turba.

JOHN M. COLES, del consejo del Fitzwilliam College adscrito a la Universidad de Cambridge, se retiró de su cátedra de prehistoria europea en 1986. Obtuvo el doctorado en arqueología en la Universidad de Edimburgo en 1959 y otro en ciencia en la Cambridge en 1980, este segundo en reconocimiento a sus muchas publicaciones científicas. Desde que abandonó Cambridge, ha dirigido varios proyectos y actuado como asesor en arqueología. Coles, especializado en arqueología experimental y en terrenos acuosos, se dedica ahora al arte rupestre escandinavo.

Una rápida visita al yacimiento, situado a unos 400 kilómetros de Cambridge, confirmaron el carácter antiguo de la madera: había sido trabajada con instrumentos cortantes de piedra y de madera y sugería la apasionante posibilidad de que se tratase de la reliquia de una comunidad neolítica (de la edad de Piedra reciente). Los estudios que realicé el verano siguiente, con un grupo de alumnos, revelaron pronto que la tabla no era más que una pieza de una serie de muchos miles que formaban una calzada de 1800 metros de largo a través de una ciénaga. Los análisis de radiocarbono revelaron que la madera era extraordinariamente vieja: databa de hace unos 6000 años, a comienzos del período Neolítico. Sweet había encontrado la carretera más antigua jamás descubierta.

Nuestras investigaciones de la carretera, conocida ya como la pista de Sweet, continuaron durante un decenio, a lo largo del cual seguimos su trazado y excavamos 400 metros de la misma, en zonas donde la recogida de turba comercial iba a destruir los restos de la pista. Analizamos también la construcción de la calzada y reunimos otras pruebas sobre las habilidades y actividades de sus constructores. La compañía de la turba colaboró maravillosamente, pero en ocasiones estuvimos a punto de ser desbancados por otras empresas ocupadas también del drenaje. Una vez llegamos a un lugar amenazado en el momento justo: una máquina acababa de empezar a excavar en medio de la pista. De haber llegado 15 minutos más tarde, no hubiéramos encontrado más que un montón de madera hecha astillas.

El decenio de investigación ha proporcionado muchos testimonios sobre la vida de los constructores de la pista de Sweet y revelado adelantos tecnológicos de los tiempos neolíticos hasta entonces desconocidos. En buena medida, nuestros descubrimientos se vieron facilitados por la abundancia y el excelente estado de conservación de la madera, dentro y a los lados de la antigua carretera. La madera era fundamental en las tecnologías primitivas, pero es un hallazgo raro en las estaciones neolíticas, la mayoría de ellas situadas en terrenos secos. Por ser materia orgánica, la madera se reseca y se descompone con bastante rapidez cuando queda expuesta al aire. Sobrevivió muy bien en los Levels porque la turba sumergida conservó húmeda la madera, bloqueando el desarrollo de bacterias y de hongos que la hubieran degradado, e impidió que fuese detectada por animales y humanos.

Dado que las turberas explican tanto la conservación como el hallazgo de la pista de Sweet, parece aconsejable que, antes de exponer con detalle lo que encontramos, relatemos la historia de la formación y la explotación de turba en los Levels.

Los Levels de hoy se pueden concebir como una ancha artesa, limitada en líneas generales al norte y al sur por los montes de Mendip y de Quantock, al oeste por el canal de Bristol y al este por el suave declive del territorio del condado de Somerset (los Levels se encuentran a unos 80 kilómetros al oeste de Stonehenge, cuyos primeros arcos fueron erigidos unos 2000 años después de la pista de Sweet).

Durante generaciones, los Levels han sido un territorio de praderas verdes, turberas negras y zanjas de drenaje llenas de agua. Hubo un tiempo, sin embargo, en que la tierra era un

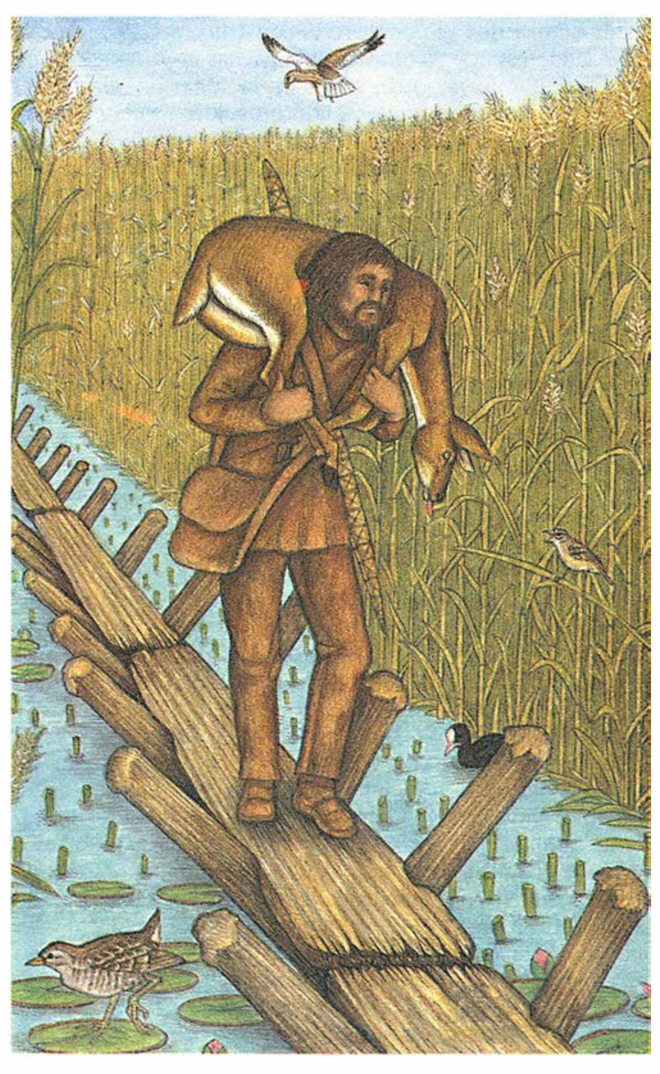
antiguo fiordo. Se había inundado cuando las capas de hielo del hemisferio Norte comenzaron a derretirse bruscamente, hace 10.000 años, haciendo subir el nivel del mar. En esa época, la superficie del agua sólo estaba interrumpida por algún que otro islote de arena o roca y por los montes Polden, que separan el sector norte de los Levels —el valle del río Brue— del sector meridional, una comarca llamada Sedgemoor. La cuenca ha estado más o menos sumergida en agua desde entonces, aunque no siempre por el mar.

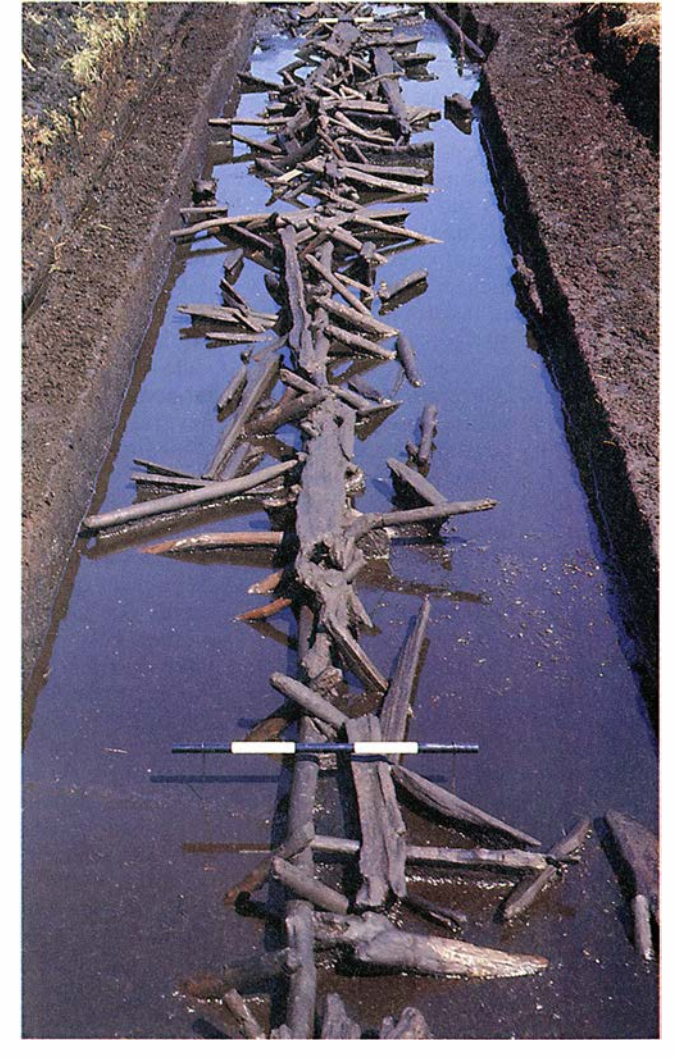
Allá por el 5000 a. C., las aguas del océano Atlántico habían cubierto el suelo del valle de gruesos sedimentos salinos de arcilla. Durante 500 años, el mar estuvo prácticamente alejado del valle, quizá por bancos de arena que se formaron en el borde occidental de los Levels y por los sedimentos depositados en ellos por los ríos Brue, Axe y Parrett. El valle se convirtió en una ciénaga salobre cuando las lluvias torrenciales en los montes de alrededor aprovechaban el escaso declive del valle para hacer que los ríos y el agua de los meandros que surcan los Levels los inundasen repetidamente. Semillas de juncos echaban raíces en las arcillas marinas formando una marisma de agua dulce.

La inmersión permanente inició la formación de la turba, a medida que los juncos crecían, morían y caían al cieno. Allá por el 4000 a. C., la turba de juncos tenía quizás un metro de espesor. Por entonces, el valle apenas había sufrido la acción del hombre. En cambio, estaba ocupado por animales salvajes, peces y multitud de invertebrados.

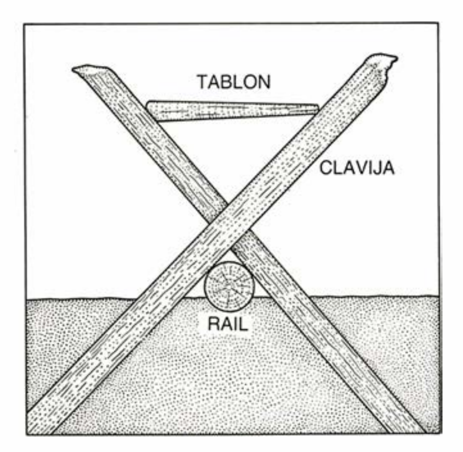
Siglo tras siglo de inmersión, la turba continuaba acumulándose, hasta acabar alcanzando unos diez metros de espesor. Al irse desarrollando capa tras capa, retenía polen. Los granos de polen, que son capaces de desplazarse a cierta distancia antes de posarse, se pueden distinguir fácilmente por su forma y contar al microscopio. De este modo, los granos de polen retenidos proporcionan un registro de la vegetación natural y, a veces, de las plantas cultivadas (reflejo éstas de la actividad humana) de una extensa región.

Hacia el año 4000 a. C., los primeros agricultores de las islas Británicas empezaron a llegar del continente europeo en busca de tierras que roturar y cultivar. No se podía encontrar mejor sitio que los Le-





1. PISTA DE SWEET, descubierta por Raymond Sweet. Atravesaba antaño 1800 metros de una ciénaga cubierta de cañas y tenía un aspecto semejante a la recreación que el artista pintó a la izquierda. El peatón que pasase por tal carretera llevaría útiles de piedra y de madera y vestiría ropas hechas de pieles de animales y fibras vegetales. La carretera sucumbió (quizás en el plazo de un decenio o dos, después de construida) a consecuencia de la subida de nivel del agua y de la acumulación de turba. De hecho, el agua arrancó, al parecer, muchos de los tablones que formaban el piso de la pasarela. De ahí que, cuando excavó algunos tramos de la pista (*a la derecha*), el autor encontró pocos tablones aún en su sitio, pese a que gran parte de la infraestructura estaba intacta en lo fundamental. Un tablón que había permanecido en su sitio puede verse en el centro.



2. SECCION TRANSVERSAL de la pista de Sweet, que revela su infraestructura, formada por raíles sencillos, dispuestos en hilera y clavijas, largas y afiladas. Estas últimas estacas se hundían en la ciénaga de suerte que cada par o grupo tuviese forma de aspa, con el vértice apoyado en el raíl. La horquilla que formaban las clavijas sostenía, por su parte, los tablones.

vels. Los colonos podían dirigirse a la marisma de las tierras bajas, en busca de alimentos silvestres y materias primas (tales como el brezo para techar). Podían explorar los márgenes de la ciénaga en busca de sauces y de abedules (útiles para hacer cuerdas, estacas y las mamparas llamadas vallas), y de pescado, castores, nutrias, ciervos y jabalíes. Y podían talar los bosques de las laderas altas y secas para extraer madera y conseguir tierras de labor y zonas de pastos.

El registro del polen revela que los episodios de tala de bosques y cultivo subsiguiente continuaron produciéndose en los montes durante varios miles de años. La desaparición episódica de polen de cereales y de cizaña, unida a la aparición de polen de especies arbóreas antes agotadas, indica el periódico abandono de los poblados en algún que otro lugar.

El registro del polen termina hacia el 400 d. C., cuando cesó la formación de turba. Inmensas inundaciones arrasaron los Levels, impidiendo en gran medida el crecimiento de nuevas plantas. Más tarde, la zona se desecó en parte, pero las condiciones de entonces ya no eran las apropiadas para la formación de la turba.

La turba siguió sin ser recogida por los humanos durante algún tiempo; pero se viene cortando ya desde hace, por lo menos, mil años (inicialmente se quemaba como combustible, y en fechas más recientes se ha venido utilizando como fertilizante). Hay constancia en documentos medievales de las disputas entre las grandes abadías de Glastonbury y de Wells (en el margen oriental de los Levels), tanto por el control de la turba, como por los derechos a otros recursos: pastos de verano y junqueras.

Como los Levels tienen un alto nivel de agua freática, hasta hace poco sólo se extraía la turba próxima a la superficie; pero en los últimos decenios, las bombas eléctricas y de aceite pesado han transformado la industria de la extracción de turba. Ahora, toda la extensión de los Levels está sometida a drenaje. La extracción a gran escala ha descubierto centenares de vestigios del pasado remoto, incluidas muchas carreteras antiguas, pero las máquinas extractoras de turba también han aniquilado buena parte del legado prehistórico. Al abrirse camino por los campos de turba, han rebajado la superficie, año tras año, hasta no dejar, en algunos sitios, nada que cubra las arcillas marinas subyacentes. Campos que antaño soportaban cañas, plantas de algodón, juncos y musgos brillantes están ahora desnudos, grises, faltos de vida, espectáculo que mueve a la tristeza.

El lugar donde se descubrió la pista de Sweet —Shapwick Heath— era una zona desolada en 1970, cuando Raymond Sweet trabajaba allí. Casi toda la turba había sido extraída, dejando sólo por recoger un metro del material más bajo y antiguo. Situado al norte mismo de los montes Polden, en la mitad meridional del valle del río Brue, el lugar contrastaba vivamente con el susurrante cañaveral de la ciénaga que había sido 6000 años antes, cuando se construyó la pista.

¿Por qué se trazó la pista y qué hemos aprendido de ella? Los datos disponibles indican que los constructores de la pista de Sweet vivían en un poblado de las suaves laderas de los montes Polden; abrieron la carretera para que les sirviera de camino de unión entre dos islas en las que los colonos desarrollaban también actividades: una isla de arena sobresaliente, al norte de los montes Polden, y la isla de Westhay, un afloramiento de caliza relativamente grande, a unos dos kilómetros al norte de la isla de arena. Los constructores de la pista explotaban la madera de la isla meridional, como lo hacían de los montes, y cultivaban también la tierra allí. No está tan claro el provecho que sacaban de Westhay. Esta tenía bosques y era una fuente de madera; partes de ella pudieron convertirse en tierras de cultivo o en pastos para animales domésticos, quizás ovejas y vacas. Ciertos indicios parecen revelar también que Westhay estaba poblada; algunos de los constructores de la pista pudieron haber vivido allí, y no en los montes Polden.

Para construir el camino, los trabajadores seleccionaron aproximadamente una docena de especies de madera de los bosques del norte y del sur de la pista que proyectaban. Talaron los árboles de mayor tamaño (en su mayoría robles, fresnos, olmos y tilos), algunos de ellos de un metro de diámetro, para hacer tablas largas para la superficie. Los árboles eran descortezados, cortados y troceados en el bosque. Troncos (ramas y árboles jóvenes) de muchas especies —avellano, fresno, abedul y olmo— se recogieron para la infraestructura de soporte, compuesta de guías o raíles (trozos largos de troncos bastante gruesos) y clavijas (trozos de troncos delgados, afilados por un extremo).

Una vez llevada la madera a los puntos terminales del norte y del sur, comenzó la construcción. Primero, se colocaban, uno a continuación de otro, raíles en la superficie de la ciénaga. A continuación, se clavaban en la turba (con las puntas hacia abajo) parejas de estacas o clavijas, de modo que formasen una X alta, con su vértice inferior apoyado en el raíl. Las X se espaciaban metro a metro, aproximadamente; así, sus brazos superiores formaban un andamio en forma de V en el que se podía encajar un tablón. Los tablones se ponían uno a continuación de otro, paralelos a los raíles (quizá después de hacerles muescas para ajustarlos mejor a las clavijas), formando una pasarela estrecha, elevada unos 40 centímetros por encima de los raíles [*véase la figura 2*]. Los raíles eran fundamentales, porque, sin ellos, el peso de las tablas hubiera provocado el hundimiento gradual de la pista en la turba. Los raíles servían para distribuir la carga y, con ello, evitar o retrasar el hundimiento.

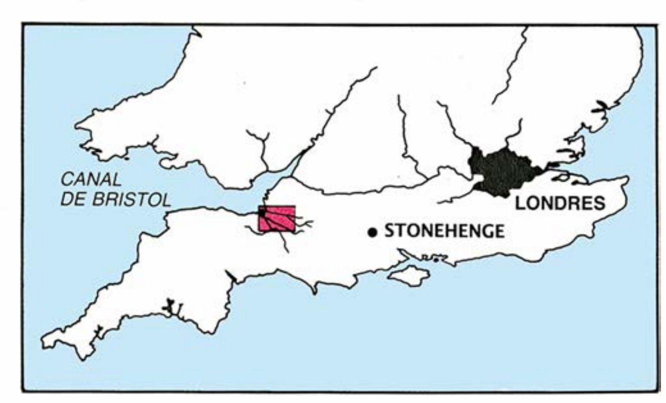
Los experimentos realizados al construir una réplica de la pista de Sweet indican que sus elementos se podían armar con rapidez y facilidad, para hacer una pasarela sólida, elevada, cosa de medio metro, sobre la ciénaga: claramente por encima de los niveles normales del agua y lo bastante alta para proporcionar un piso seco a los peatones. A decir verdad, la facilidad con que pudimos colocar en su sitio las estacas y los tablones nos demostró que la totalidad de la pista, de algo más de kilómetro y medio, podían instalarla diez hombres en el intervalo de un solo día. Esto no es menospreciar la proeza de los constructores de la pista, sino realzar su

destreza en el trabajo de la madera y en la ingeniería de una construcción tan compleja.

La prueba de esta muestra de colaboración y construcción rápida viene dada, en parte, por el minucioso análisis de los anillos de los árboles de los tablones, raíles y clavijas. Cada anillo representa un año de crecimiento, y la anchura del anillo es el reflejo de las condiciones de un año de desarrollo. La presencia de una secuencia muy semejante de anillos anchos y finos, en una serie de muestras de madera, indica que los árboles de los que proceden las muestras crecieron en la misma región, en las mismas condiciones y al mismo tiempo.

Nuestros análisis de los anillos de los árboles han demostrado que casi todos los trozos de roble y de fresno (que es como decir la mayoría de los tablones) pertenecen a árboles talados en el mismo año, es decir, en un mismo punto de la secuencia de anillos coincidentes. Los avellanos y otros árboles cortados para las clavijas habían sido talados también en un solo año, probablemente a la vez que se cortaban los tablones.

La probabilidad de que la difícil empresa de construir la pista se llevase a término en un breve plazo aboga por una organización social fuerte. Aparentemente, los colonos acordaron que hacía falta una pista de unión de sus poblados y sus campos; se pusieron de acuerdo en la situación pre-



3. SOMERSET LEVELS, donde se encontró la pista de Sweet; están en el sudoeste de Inglaterra. Cubren unas 40.000 hectáreas de tierras bajas (*en blanco*), limitadas al oeste por el canal de Bristol y por montes en los otros flancos; el entintado verde representa alturas de 15 metros, o más, sobre el nivel del mar. Los Levels están salpicados de "islas" de arena (*amarillo*) y de roca (*gris*), y en parte divididos en dos por el macizo de caliza de los montes Polden. Además de la pista de Sweet (*rojo*), construida hacia el 4000 a. C., para enlazar una isla pequeña de arena con la isla de Westhay, hay en los Levels varias pasarelas más recientes, fechadas entre 2500 y 3500 a. C.; se indican las partes excavadas de estas pistas (*líneas rosadas*) y sus recorridos (*líneas entrecortadas*). Las zonas donde se encontraban probables asentamientos entre 2500 y 4000 a. C. aparecen aquí indicadas también (*rayados*). Los cursos fluviales representados son los actuales.

cisa que había de tener y enviaron exploradores que señalasen su trazado. Sabemos que hubo un trazado previo, anterior a la construcción, porque hemos recuperado postes de madera que señalaban en sus líneas generales el recorrido de la pista, sin cumplir un cometido estructural en ella. Los constructores tuvieron que cuidarse también de organizar el trabajo necesario para las labores de mayor empeño: talar los árboles, preparar los elementos requeridos por la pista y transportar las pilas almacenadas hasta la ciénaga. La construcción en sí fue, quizá, la tarea menos difícil.

Los análisis de los anillos de los troncos proporcionan también algunos indicios de que los constructores de la pista de Sweet no fueron los primeros pobladores de los Levels. La madera de la parte norte indica que, en ese tramo, la pista encerraba árboles de 400 años de edad, cuyo grado de madurez sugiere que el bosque no había sufrido modificaciones antes de que la carretera se construyese. En cambio, la madera del lado meridional de la pista indica que aquella parte del bosque contenía robles de 120 años de edad, lo que significa que los robles existentes allí habían sido diezmados, hacía aproximadamente un siglo, por un grupo de los más primitivos agricultores de Gran Bretaña, probablemente antepasados directos de los constructores de la pista.

Los datos de los anillos de los árboles sugieren también que la pista sólo cumplió su cometido durante un breve período de tiempo. Sólo algunos tablones proceden de árboles talados con posterioridad al resto de la madera, y las fechas llegan únicamente a once años después de la construcción de la pista. La madera cortada durante ese breve período fue intercalada en reparaciones realizadas en lugares donde las inundaciones ocasionales habían arrastrado tablones o deteriorado la pista.

La ausencia de arreglos más recientes indica que las repetidas inundaciones, el incesante crecimiento de cañas, la acumulación de turba debajo y alrededor de la pista y el consiguiente ascenso del nivel del agua acabaron por cegarla. La pasarela ya no tenía altura suficiente sobre la ciénaga para ser rentable o reparable. Y por eso creemos que un niño que hubiera podido ayudar a construir la pista, apenas habría sido un adulto cuando ésta fue finalmente abandonada a merced de las cañas y las turbas que la sepultaron y ocultaron.

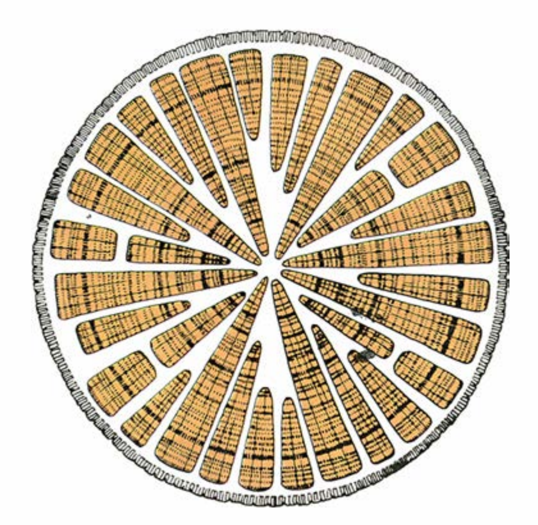
La calidad del trabajo de la madera de la pista de Sweet revela algo más acerca de las gentes que la hicieron y del modo como procedieron en ella. Nuestros experimentos —que supusieron la tala de robles y de fresnos con útiles neolíticos originales, el corte de tablones a partir de troncos y recortar con hachas muescas y agujeros en los tableros resultantes— acreditan, en los constructores, un profundo conocimiento de las propiedades de la madera. También manejaban sus herramientas de madera y piedra con notable destreza. (Los agricultores neolíticos no podían servirse de hachas ni de sierras de metal.)

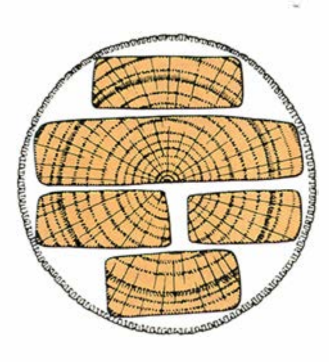
Para hacer tablas de roble, por ejemplo, talaban árboles que les proporcionasen maderas fuertes, rectas, libres de nudos y de ramas laterales. Después, aprovechando la tendencia de los leños del roble a henderse radialmente, cortaban en tablas los troncos mayores, clavando cuñas en los radios [*véase la figura 4*]. Cortados de ese modo, los robles jóvenes hubieran proporcionado tablones demasiado estrechos, por lo que a éstos los cortaban lateralmente, tarea ardua y difícil.

Los extremos aguzados de las clavijas atestiguan la destreza de los constructores. Estaban en posesión de hachas de piedra de buena calidad, las afilaban a menudo y conocían las propiedades de las diversas maderas. Por ejemplo, cortaban el avellano y el abedul a tajos secos, mientras que el sauce y el álamo, que se resisten a esa forma de corte, los mondaban en forma de largas puntas.

Las clavijas (de las que había 6000) nos demostraron, además, que los constructores de la pista se ocupaban de la explotación de los bosques, la más antigua que se conoce en el mundo. Hacían una tala selectiva de avellanos y fresnos, y probablemente también de robles y abedules, para estimular el crecimiento rápido de muchos rebrotes sobre los troncos cercenados. Por este procedimiento, obtenían brotes rectos como varillas, que se podían cortar al cabo de unos pocos años. Tenemos muchas estacas en las que los anillos del árbol delatan el crecimiento rápido, y cuya forma recta señala una gestión forestal de este tipo.

La investigación de un yacimiento arqueológico acuoso no puede tener éxito sin hacer una extensa recogida multidisciplinaria de muestras de su medio, no sólo de polen para su análisis, sino también de restos macroscópicos de plantas y animales. En ese sentido, los escarabajos, cuyos esqueletos quitinosos se han conservado parcialmente en los Levels, nos han permitido dar valores específicos a lo que antes eran vagas generalizaciones sobre el clima neolítico del sur de Inglaterra. En los Levels se pueden encontrar aún varias especies de escarabajos. Otras han desaparecido, en ciertos casos por su incapacidad para tolerar los cambios climáticos. Uno de estos últimos, *Oodes gracilis*, sólo medra hoy en algunas partes de Europa continental que tienen inviernos





4. MADEROS DE ROBLE, la fuente principal de los tablones de la pista de Sweet; se convertían en tablas largas de dos maneras, según el tamaño de los árboles abatidos. Robles altos, de 400 años de edad, con diámetros de hasta un metro, se obtenían de un bosque situado al norte de la pista. Dando pruebas de su inteligencia, los constructores los cortaban radialmente (*izquierda*) para formar tablas que medían de 25 a 40 centímetros de ancho. Los árboles más jóvenes, del sur de la pista, medían alrededor de medio metro de diámetro y se talaban en cortes tangenciales (*derecha*).

más fríos y veranos más cálidos que los de los Levels. La presencia del escarabajo indica, pues, que las temperaturas del invierno en el sur de Inglaterra eran de dos a cuatro grados más fríos de lo que son en la actualidad y que las del verano eran de dos a cuatro grados más cálidas.

El análisis del polen de los Levels proporcionó otras informaciones de incalculable valor. El análisis de los granos de polen de cereales y herbáceas que se crían en campo abierto constituyen nuestra mejor prueba de los cultivos que se hacían en los montes y en las islas. Además, el espectro de las especies de polen que encontramos confirma la existencia de bosques en el entorno de la ciénaga. Los datos del polen, una vez combinados con nuestro conocimiento de la madera de la pista, nos permitieron determinar la composición de los bosques de las zonas altas. El panorama general era el de un bosque mixto, en el que los robles, olmos, fresnos y tilos eran los árboles grandes más abundantes, encumbrados sobre un piso inferior de avellanos y acebos. Antes se creía que los tilos habían sido escasos en el período Neolítico, pero los datos del polen y la propia pista prueban que florecían en los Levels, especialmente en los montes Polden.



5. LOS TRABAJADORES que excavaban la pista de Sweet tenían que permanecer fuera de la superficie del yacimiento y, por ello, se les encontraba a menudo acostados boca abajo en tablas situados por encima de la carretera. Como la madera de la pista y la turba en que ésta se hallaba sumida eran ambas muy blandas, una pisada, por cuidadosa que fuese, podía haber aplastado la madera.

Un hermoso ejemplo de lo que se puede aprender de los estudios multidisciplinares es el descubrimiento de que el tramo central de la pista pasaba por encima de agua. Aquí, en lugar de un solo raíl y simples juegos de clavijas, se apilaban, uno sobre otro, tres raíles, para elevar la altura de la pasarela, prueba de que sus constructores tuvieron que adaptar su plano estructural para hacer frente a agua crecida. En último término, fracasaron; pudimos comprobar que los tablones de la pasarela estaban en desorden, caídos a un lado de la infraestructura, lo que indica que fueron arrastrados por el agua. Los análisis de restos de plantas y animales confirman la existencia de agua corriente. Las ninfeas florecían al lado de las habituales cañas y juncias; proliferaban los girinos, que viven en la superficie del agua, y las grandes arañas de balsa, que viven dentro o en la proximidad de charcas permanentes de agua, donde apresan insectos acuáticos e incluso peces pequeños. La supervivencia de restos de estas arañas, blandas de cuerpo, sepultadas en la turba durante 6000 años, es ciertamente notable.

Los útiles dejados por aquellos que recorrían la pista revelan otros aspectos de la actividad que tenía por escenario la charca y su entorno. La pista no medía más de unos 30 centímetros de ancho, pasando entre cañas altas, que deben de haber ocultado el término de la misma a la vista del caminante. Cañas que impedían la visibilidad, agua profunda y clavijas que sobresalían, todo ello contribuía a hacer la pasarela deficiente. ¡Un elemento del que carecía era un callejón de paso! Era de esperar el hallazgo de objetos que se hubiesen perdi-



6. ESTE EXTREMO AGUZADO de una clavija, fotografiado al poco de ser descubierto, tiene facetas limpias, que son uno de los muchos indicios de que los constructores de la pista de Sweet tenían útiles de alta calidad y los mantenían bien afilados. Esta clavija es de avellano; otras eran de acebo, abedul, aliso, manzano, sauce, tilo, fresno, olmo y roble. Las clavijas, raíles y tablones antiguos se desecan rápidamente, una vez expuestos al aire. Para evitar su destrucción, la mayor parte de la madera recobrada de la pista (incluido este ejemplar) se conservó substituyendo su agua por una cera (glicol de polietileno), proceso que requiere unos nueve meses. (Fotografía obtenida por el autor.)

do o roto al ir de camino sobre ella, así como residuos de las actividades desarrolladas en la ciénaga.

Entre nuestros numerosos hallazgos, figuran las lascas. Estos útiles, producidos golpeando núcleos de sílex fino, de color oscuro, con un martillo hecho de piedra o hueso, se encuentran en todos los yacimientos neolíticos de suelo seco. Estas muestras nos interesaban porque sabíamos, sin la menor duda, que no se habían movido de su sitio desde el mismo momento, casi, de su pérdida.

Varios útiles de lascas estaban en condiciones óptimas para analizar sus señales de desgaste. Con ayuda del microscopio, se puede precisar la función de una herramienta, examinando sus señales de uso. Sobre esta base, las lascas se pudieron reunir en determinados grupos. Uno estaba destinado a cortar madera; otro, cañas; un tercero, a cortar otras plantas (no identificadas aún, dejaban en las lascas una mancha moteada), y un cuarto (representado por una sola lasca) para pieles. Las lascas reunidas prueban que, según cabía esperar, la gente cazaba en las ciénagas y hacía uso de las cañas y de otras plantas.

También se encontraron puntas de flecha de pedernal, un indicio más de caza, si no de guerra. En algunas de estas puntas de flecha se conservan restos de pegamento, astiles y cordel de atar, hallazgos todos ellos poco frecuentes. También recuperamos muchos trozos de arcos.

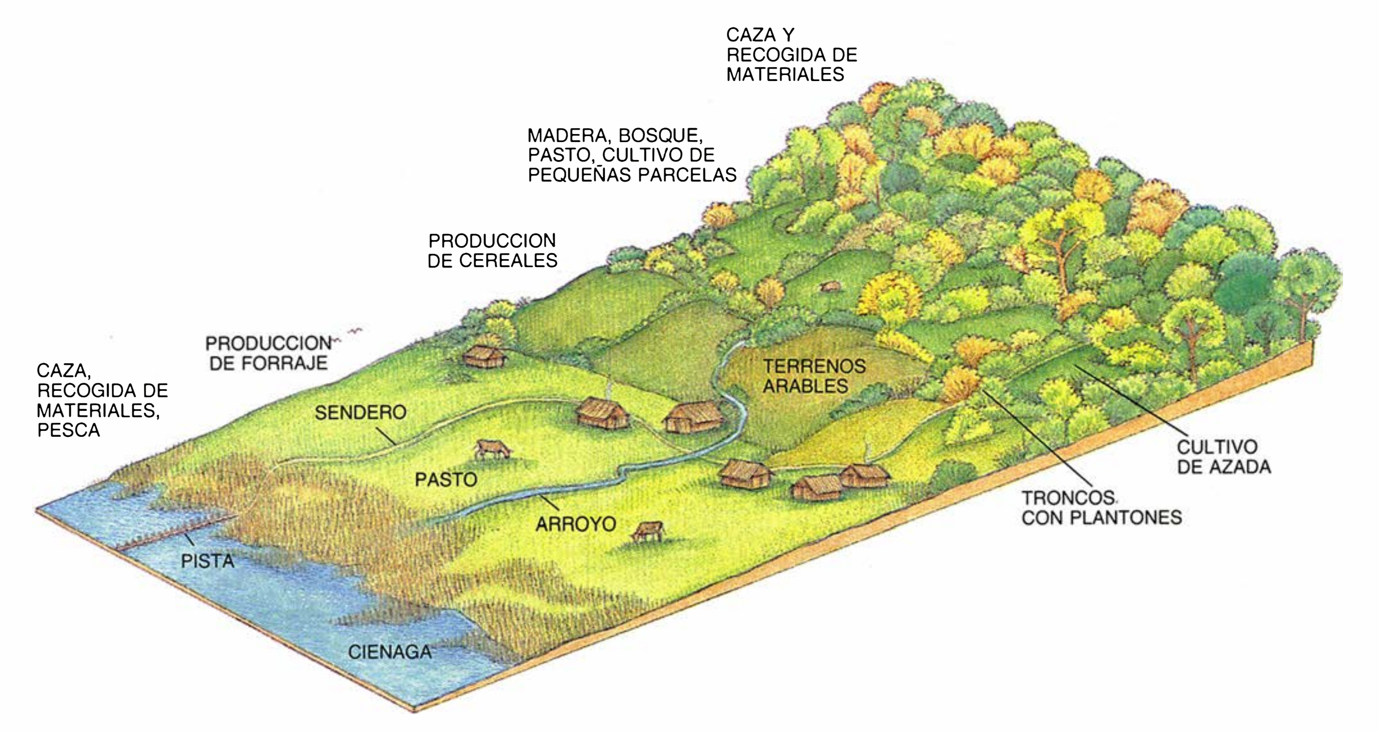
Todo el pedernal existente en los Levels era producto de importación, por lo que su presencia acredita contactos con gentes de fuera de la región. También eran piezas importadas la cabeza de un hacha de pedernal (de Inglaterra oriental) y otra —asombrosa— de jade (probablemente de los Alpes europeos), ambas sin usar. Podemos afirmar, con seguridad, que ninguna de ellas tuvo mango de madera, porque, de haberlo poseído, sin duda la turba lo hubiese conservado. El estado de las hachas, nunca enmangadas, ni usadas, indica que quizá se estaban transportando a un lugar de trabajo cuando sus infortunados propietarios las perdieron, en el curso de lo que resultó ser un paseo carísimo. Es posible también que las tales hachas fuesen depositadas a propósito en los Levels con alguna intención que ignoramos, como podría ser la de hacer una ofrenda a la pista de Sweet.

A lo largo de la pista desenterramos cerámica y artículos varios de madera. Algunos de éstos, fragmentos sueltos de cerámica, pudieron haber sido arrastrados a la ciénaga y no haber caído en ella directamente. Por el contrario, los montoncitos de fragmentos que permiten reconstruir casi por completo vasijas enteras cayeron, con bastante seguridad, de la gente que transitaba por la pista misma. En uno de estos casos, la vasija era portadora de avellanas. En otro, llevaba un agitador de madera y, quizás, alguna clase de papilla de la que no han quedado restos.

Los utensilios de madera comprenden herramientas para cavar (azadas y azadones), paletas, cuñas, mangos, una cuchara, un peine, prendedores y un cuenco. Ninguno de ellos es llamativo, ni por su construcción ni por su diseño; son la vulgar generalidad de los artículos que se supone existían. Tienen el valor, sin embargo, de que sus congéneres se han desintegrado en todos los yacimientos secos de la misma época.

Un hallazgo que causó verdadera sorpresa fue el de unos alfileres de tejo, esmeradamente alisados, cuya función ignoramos. Son trozos finos de madera, de unos 20 centímetros de largo, encorvados en la punta. Han podido servir de alfileres de adorno de nariz, o quizá ser usados para sujetar vestidos. En este último caso, los alfileres son lo único que subsiste de los vestidos y de la gente que los llevaba, pues las turbas ácidas han disuelto todo lo que era piel y hueso.

La pérdida de casi todo el material que no era vegetal es el precio que



7. ACTIVIDAD MULTIPLE de los constructores de la pista, según se ha deducido del análisis de la madera y del examen de los restos de polen, herramientas y otros materiales enterrados en la turba que rodea a la carretera. En la ciénaga, los pobladores cazaban, pescaban o cortaban cañas para la techumbre. Construyeron sus asentamientos en tierras altas, donde abrían claros en el bosque para sacar la madera necesaria y cultivar campos o preparar pastos. En su deforestación, fomentaban el crecimiento de los rebrotes de los troncos cercenados. La madera talada que hemos descubierto en la pista constituye la prueba más antigua de gestión forestal hallada hasta hoy. (La recreación ha sido realizada por Patricia J. Wynne.)

hay que pagar por la conservación excepcional de la madera y otros restos de plantas. En realidad, no sabemos nada concreto de las especies animales que los constructores de la pista cazaban o explotaban. Sabemos que había roedores, por las marcas que sus dientes dejaron en un par de avellanos, y que corresponden a un ratón de campo y a un lirón. Pero estos animalillos les interesaban probablemente muy poco a los agricultores y cazadores de los Levels de hace 6000 años.

A algunas personas puede parecerles que el detenido estudio de una breve senda que atravesaba una ciénaga constituye un ejercicio de poco mérito. Sin embargo, los descubrimientos que hemos realizado revelan la importancia de este trabajo y de la búsqueda de otros yacimientos en humedales.

Piénsese en lo que hemos aprendido sobre el pasado en nuestro tesoro de madera y en nuestros estudios del ambiente. Conocemos la vegetación de la ciénaga y del antiguo bosque, y muchas de las actividades desarrolladas tanto en la ciénaga como en los montes. Conocemos el diagrama de temperaturas de la época. En las clavijas y raíles, hechos de plantones criados en muñones de troncos, tenemos el primer testimonio de explotación forestal del período Neolítico. La pista es también un exponente de la extraordinaria capacitación de sus constructores en la tala y trabajo de la madera, a pesar de que sólo disponían de fuego y de hachas y cuñas de piedra para cortar grandes árboles. Y es de suponer que ésta no era la única gente de aquella época que poseía tales habilidades.

El rápido hundimiento de la pista, su estructura y, sobre todo, el estudio de los anillos de los árboles, garantizan que todo lo encontrado sobre, dentro y al lado de la pista era contemporáneo. Esto no es lo que se entiende por contemporáneo en términos arqueológicos, que es lo comprendido en intervalos de tiempo de 200 o, si hay suerte, de 100 años. Estamos hablando, ahora, de tiempo real. Todo —útiles de piedra y cerámica, tablones y clavijas de madera, la ciénaga, el ratón de campo y el lirón, los campos de cultivo y el desarrollo de retoños sobre troncos cortados, los bosques de la tierra seca— coexistió en un solo intervalo, de menos de una vida humana.

El relato no acaba aquí. Gran parte de la pista queda sin explorar y necesitará una atención constante, si ha de conservarse. Las construcciones antiguas enterradas en suelos acuosos se deterioran si las turbas o sedimentos húmedos se drenan, y pueden degradarse aun sin estar expuestas del todo al aire. Nuestras excavaciones de la pista de Sweet se limitaron a las partes amenazadas de destrucción, a breve plazo, por la extracción de turba. Unos 900 de los 1400 metros que subsisten se encuentran debajo de la turba de campos que se están desecando lentamente. Están en marcha negociaciones para poner coto a esa desecación. Afortunadamente, los 500 metros restantes han sido adquiridos a la compañía de la turba por agencias de conservación. Esta compañía se mostraba dispuesta a ceder sus derechos sobre el área en cuestión ante la importancia que reviste la pista sumergida. Esta área está conservada ahora mediante un ingenioso sistema de malecones de arcilla que rodean la reserva y de tubos que aportan agua para inundar las turbas a diario durante la estación seca.

La conservación permanente resulta de vital interés porque la pista y los materiales enterrados junto a ella encierran más información acerca de sus constructores de la que se puede captar con los medios técnicos actuales. Creemos, por ejemplo, que todavía pueden sobrevivir restos de alimentos, fragmentos de tejidos, huellas digitales, sangre quizás y restos de microinvertebrados, junto con otros indicios evanescentes del modo de vida de los constructores de la pista y de las contingencias a que tuvieron que hacer frente. Si la pista se logra conservar, los arqueólogos del futuro podrán volver a ella, cuando dispongan de los refinados instrumentos y de los métodos analíticos necesarios para recabar mayor información. Es de terrenos acuosos como los Somerset Levels de donde sacaremos pruebas, de la calidad y precisión requeridas, para llegar a entender la dinámica del proceder humano, lo que constituye, en última instancia, el objetivo de la arqueología.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PREHISTORY OF THE SOMERSET LEVELS. J. M. Coles y B. J. Orme. Somerset Levels Project, Universities of Cambridge and Exeter, 1982.

SOMERSET LEVELS PAPERS 10. Somerset Levels Project, Universities of Cambridge and Exeter, 1984.

SWEET TRACK TO GLASTONBURY: THE SOMERSET LEVELS IN PREHISTORY. Bryony y John Coles. Thames and Hudson, 1986.

El metanol, un combustible alternativo

El empleo del metanol puro reduciría en los vehículos la emisión de hidrocarburos y de gases que contribuyen al efecto de invernadero, aliviando además la dependencia de la importación de otros recursos

Charles L. Gray, Jr., y Jeffrey A. Alson

El automóvil privado ha configurado la sociedad hasta un grado no alcanzado por ningún otro producto de la era industrial. La movilidad y comodidad que ofrece, en perfecta sintonía con el deseo de libertad personal, han encumbrado al automóvil, que domina no sólo el sistema de transportes, sino también la propia cultura de los países desarrollados. La industria automovilística se ha convertido en un pilar de la economía norteamericana; representa más del diez por ciento del producto nacional bruto y un veinte por ciento del gasto de los consumidores. Pero el ingenio constituye también una amenaza contra la calidad de vida, contaminando el aire de las ciudades y la atmósfera en general, pues las emisiones de los automóviles contribuyen al efecto de invernadero. Para resolver tan graves problemas ambientales, la industria debe afrontar desafíos sin precedentes en el ámbito social, político y técnico.

Para alcanzar esta meta creemos que la nación debe dar los primeros pasos hacia un nuevo carburante. Después de haber estudiado un amplio abanico de posibilidades alternativas, creemos que ese combustible debería ser el metanol. Su empleo rebajaría las emisiones hasta un nivel inalcanzable por los controles más avanzados en los vehículos de gasolina. Aunque en los últimos quince años se han conseguido reducciones sustanciales de contaminantes nocivos y de gases que producen el efecto de invernadero expulsados por los vehículos particulares, el parque de éstos ha ido aumentado sin cesar. Más de un centenar de ciudades presentan todavía niveles ambientales de monóxido de carbono, partículas en suspensión y ozono (producido en reacciones fotoquímicas con los hidrocarburos procedentes de los escapes de los vehículos) que exceden los límites establecidos por la Oficina de Protección Ambiental (EPA) para defender la salud pública. Si el parque automovilístico continúa creciendo durante esta década, la calidad del aire empeorará, a no ser que se fabriquen modelos mucho más limpios que los que circulan actualmente.

La introducción del metanol en la infraestructura de transporte de los Estados Unidos requeriría cambios bastante modestos en el sector energético y en el automovilístico. Nuestras investigaciones nos han llevado al convencimiento de que éste es el único medio práctico para alcanzar reducciones significativas en las emisiones de los vehículos manteniendo la movilidad individual a que están acostumbrados los norteamericanos. Aunque esta transición acarreara ciertos costes, también se obtendrían beneficios notables, no sólo para el ambiente sino también, y con mayor seguridad, para la economía nacional. Hay pruebas irrefutables, basadas en comprobaciones de vehículos y simulaciones por ordenador de que, si los vehículos funcionaran con metanol puro, se obtendría una notable reducción en los niveles urbanos de ozono y sustancias tóxicas. Además, el metanol puede producirse con la técnica actual a partir de fuentes variadas y abundantes: gas natural, carbón, madera e incluso los residuos orgánicos. Iniciando la transición hacia el metanol, la nación podría finalmente disminuir su dependencia energética exterior.

La búsqueda de un carburante limpio se ha convertido en una necesidad apremiante. California y los estados del nordeste están solicitando que se endurezcan las restricciones vigentes en el país sobre las emisiones de los vehículos de gasolina; el Congreso está considerando, por su parte, nuevas enmiendas al Acta de Limpieza del Aire. Crece el convencimiento de que —supuesto que no se dé un masivo abandono del automóvil privado— la única forma eficaz para conseguir reducciones importantes de las emisiones consiste en la sustitución del combustible convencional, como la gasolina o el gasóleo, por otro más limpio. Entre los candidatos se encuentran el gas natural comprimido, el gas de petróleo licuado, la electricidad, el etanol ("alcohol de grano") y el metanol ("alcohol de madera"). Las gasolinas sintéticas son caras y no ofrecen ventajas para el ambiente, por lo que han perdido todo interés.

Las posibilidades alternativas más prometedoras residen, sobre todo, en los combustibles basados en el carbón cuyas moléculas son menores y más simples que las de la gasolina. Estas moléculas se queman con mayor limpieza que la gasolina, en parte porque carecen de enlaces carbono-carbono

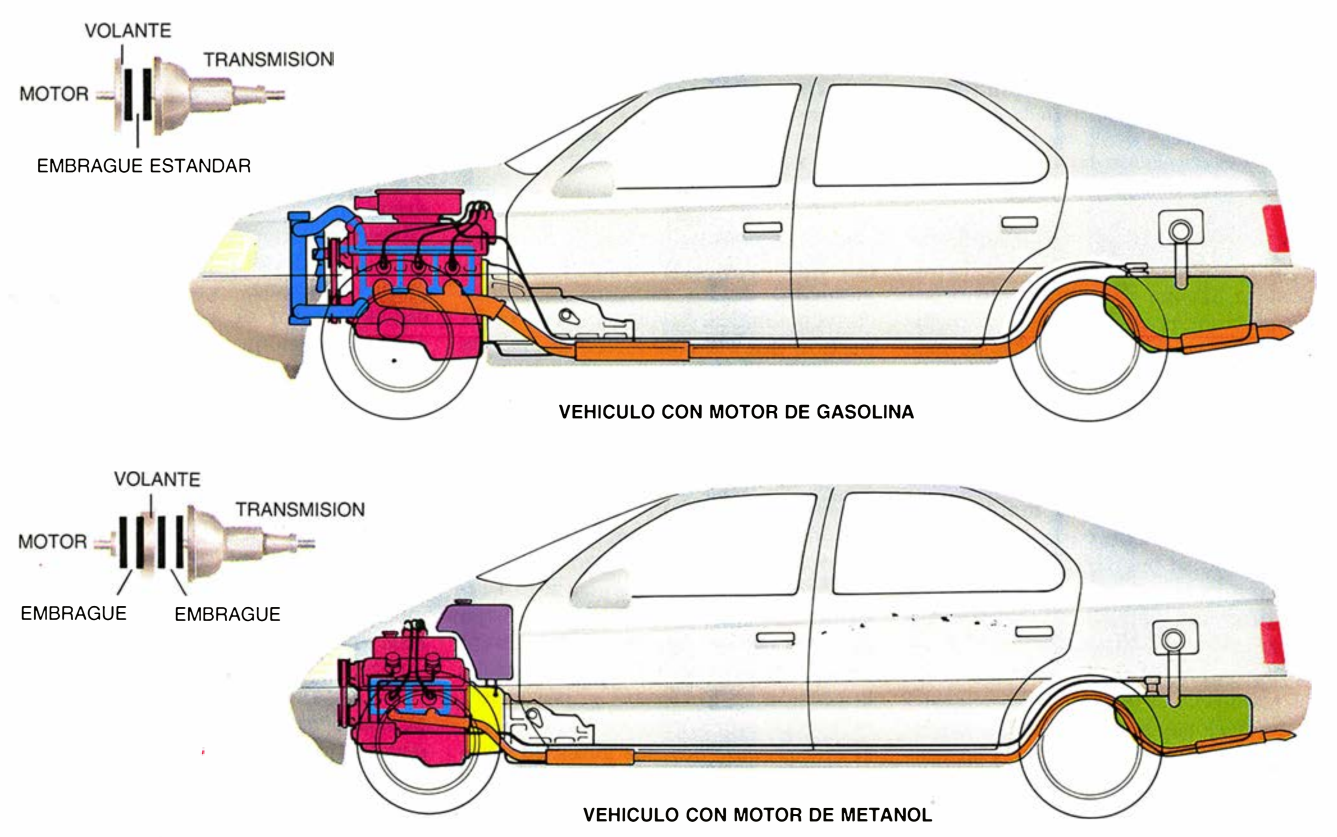
CHARLES L. GRAY, JR., y JEFFREY A. ALSON trabajan en el Departamento de Tecnología de Control de Emisiones de la Oficina norteamericana de Protección Ambiental (EPA) en Ann Arbor. Han intervenido de manera decisiva en el programa de combustibles alternativos de la EPA. Gray dirige el departamento, que dicta las normas sobre emisiones de vehículos. Estudió ingeniería química en las universidades de Mississippi y Michigan. Alson, adjunto de Gray, cursó la carrera de ingeniería en la Universidad de Purdue.

—o tienen pocos— y es menos probable que los hidrocarburos emitidos en la combustión produzcan ozono. La combustión de moléculas mayores, que poseen gran número de enlaces carbono-carbono, implica una serie más compleja de reacciones que aumenta la probabilidad de una combustión incompleta. Los combustibles alternativos presentan inconvenientes desde un punto de vista práctico. El gas natural comprimido debe mantenerse a una presión de 130 o 200 atmósferas, por lo que necesita un pesado conjunto de depósitos. Esta es una seria desventaja en lo referente a las prestaciones del vehículo y al rendimiento energético. El gas de petróleo licuado se enfrenta a limitaciones fundamentales en su suministro. Los vehículos eléctricos están hoy condicionados por la técnica de las baterías, pesadas y necesitadas de recarga frecuente, un proceso que consume tiempo. A no ser que se produzcan grandes avances técnicos, cada una de estas fuentes de energía probablemente sólo se aplicará en actividades de algún sector particular del mercado: camiones de reparto y autobuses urbanos.

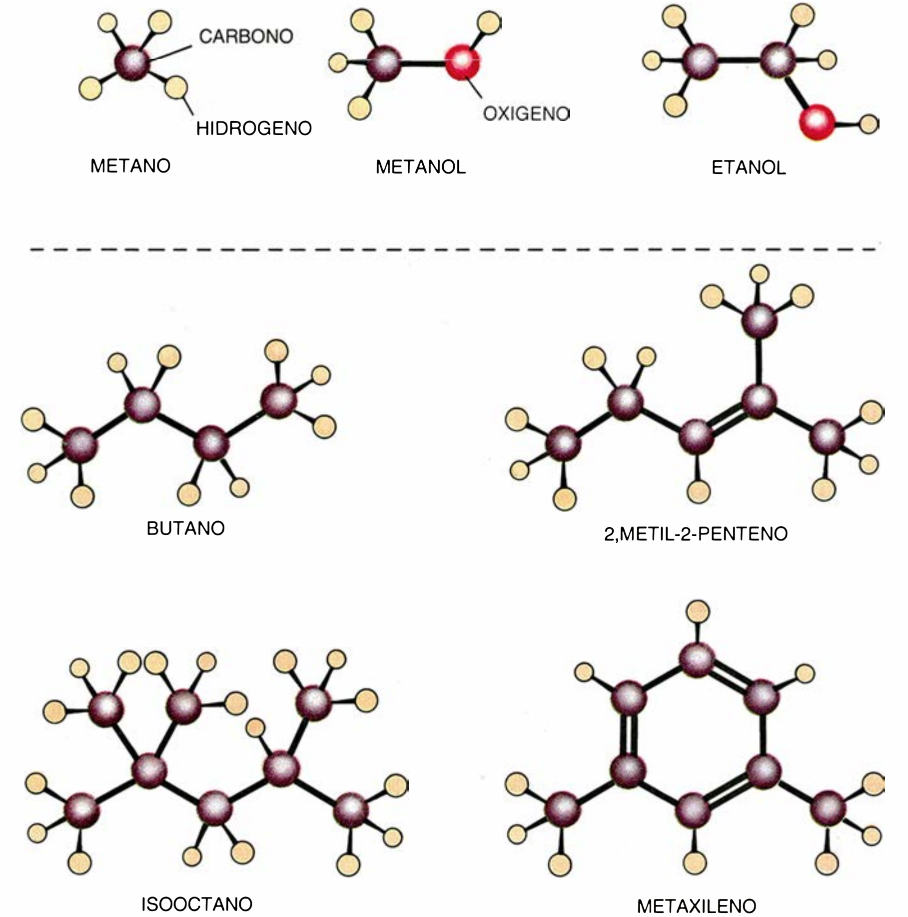
Los combustibles líquidos como el etanol o el metanol ofrecen notables ventajas: poseen un mayor contenido energético por volumen que otros combustibles alternativos e impondrían cambios mínimos en la red existente de distribución de carburante. El etanol suele emplearse como suplemento de la gasolina, aunque su precio viene a doblar el del metanol, cuyo importe constituye uno de sus aspectos más interesantes. A partir de estudios económicos de la producción y distribución del metanol se concluye que el equivalente en combustible de un litro de gasolina —alrededor de dos litros de metanol— costaría al consumidor alrededor de 29 centavos de dólar. El metanol también tiene una presión de vapor que es la mitad que la de la gasolina, por lo que la evaporación será una fuente despreciable de contaminación. Más importante aún: el metanol puede reducir en un 90 por ciento las emisiones de gases de los vehículos que contribuyen a la formación de ozono de la superficie del suelo, el contaminante más grave de la atmósfera urbana. Por último, las propiedades del metanol permiten el diseño de un automóvil mucho más eficiente que los que circulan, manteniendo a la vez un nivel muy bajo de emisiones.

Como cualquier otro combustible alternativo, el metanol no se halla exento de críticas. Pero muchas de las objeciones se basan en vehículos copiados directamente de los de gasolina que ni siquiera incorporan las mejoras de diseño más sencillas que posibilita el metanol. En ese sentido, es cierto que un determinado volumen de metanol contiene sólo la mitad de energía que la gasolina o el gasóleo, por lo que, manteniendo el resto de los componentes del automóvil, se tendría que instalar un depósito de combustible mayor y más pesado. Ahora bien, puesto que los vehículos de metanol podrían diseñarse de modo que mostraran un mayor rendimiento, necesitarían, en comparación, menos combustible. Existen, además, otra serie de objeciones a las que nos referiremos luego.

Las primeras versiones de vehículos propulsados por metanol se limitarán quizás a incorporar en el motor las mejoras más sencillas que permite el nuevo combustible. Con todo y con



1. TURISMO PROPULSADO POR METANOL, en el que se podrían incorporar diversas modificaciones para alcanzar un mayor rendimiento y generar menos emisiones que en un vehículo tradicional de gasolina. El alto octanaje y la baja pérdida de calor de la combustión del metanol permiten un motor pequeño y eficiente (*rojo*), reduciéndose también el tamaño del depósito (*verde*), colector de escape (*naranja*) y embrague (*amarillo*). El sistema de refrigeración (*azul*) podría ser menor, si se sustituyera el radiador y el ventilador por un aislante térmico y un refrigerante más caliente. Este cambio disminuiría el tamaño y la resistencia aerodinámica del morro. Un sistema de arranque y parada con un volante (*detalle*) paralizaría el motor cuando el vehículo decelerara. Un motor de bomba hidráulica (*en color morado*) almacenaría energía durante el proceso de frenado.



2. COMBUSTIBLES DE HIDROCARBUROS SENCILLOS; metano, metanol y etanol; arden limpiamente y producen sobre todo dióxido de carbono y agua. Por el contrario, las moléculas de gasolina son complejas y contienen muchos enlaces entre átomos de carbono. Resulta mucho más probable que estas moléculas dejen compuestos de hidrocarburos sin quemar, fotoquímicamente activos.

ello, estos vehículos rebajarían de inmediato la contaminación de la atmósfera urbana. Basándose en pruebas efectuadas en la EPA con prototipos, estos primeros vehículos de metanol tendrían un rendimiento en torno al 30 por ciento superior con relación al motor de gasolina más avanzado y su aceleración sería considerable.

Pero el automóvil de metanol del futuro contaría con varias innovaciones que no se pueden alcanzar con la gasolina o el gasóleo. (Otras características que describimos se podrían emplear en vehículos de gasolina o gasóleo, aunque sin conservar los bajos niveles de emisiones del metanol.) Estas mejoras aumentarían el rendimiento general del vehículo, y se conseguiría una reducción aún mayor de las emisiones de dióxido de carbono en comparación con la que se obtendría mediante la pura adaptación del motor para quemar metanol. Por supuesto, mejoraría notablemente el consumo de combustible.

Para comprender el origen de las posibles mejoras, hemos de empezar por considerar el principio de funcionamiento de los motores de coche convencionales. Los motores de combustión interna convierten la energía química, que el combustible almacena, en energía mecánica: la combustión produce gases calientes, que ejercen una presión sobre las paredes de la cámara de combustión. Esta presión fuerza el movimiento de un pistón, que hace girar el cigüeñal y finalmente las ruedas motrices.

Varios factores disminuyen el rendimiento del motor. El calor se disipa a través de las paredes de la cámara de combustión, por lo que se reduce la presión en la cámara y, por tanto, la energía aprovechable para operar el motor. Además, los gases de combustión todavía están a temperatura y presión elevadas al final de la fase de expansión, limitada por exigencias físicas en el diseño del motor. Los gases calientes se expulsan del motor aunque lleven todavía una cantidad apreciable de energía.

Así, pues, en el mejor de los casos el motor de un turismo convierte en trabajo útil alrededor del 35 por ciento de la energía química del combustible. En la conducción normal en ciudad, el promedio del motor llega sólo al 15 por ciento. En la conducción mixta por ciudad y carretera, aproximadamente el 30 por ciento de la energía se emplea en aceleración, un 30 por ciento en vencer la resistencia a la rodadura y otro 30 por ciento en vencer la resistencia aerodinámica; el 10 por ciento restante se reparte entre pérdidas por fricción en partes móviles, como la transmisión, y el funcionamiento de accesorios.

¿Qué puede hacerse para mejorar el rendimiento de un vehículo? En primer lugar, hay que aumentar la fracción de energía química del combustible que el motor transforma en trabajo mecánico. Las pérdidas por fricción en las partes móviles, los neumáticos por ejemplo, deben reducirse al mínimo, así como la resistencia aerodinámica. Como el peso del vehículo es directamente proporcional a las pérdidas por fricción y a la energía necesaria para la aceleración, su disminución se convierte en cuestión prioritaria. Se ha de reducir, por último, la energía perdida al frenar, quizás almacenando la energía de deceleración para su uso posterior.

El vehículo propulsado por metanol disfruta de varias ventajas en lo que se refiere al aumento del rendimiento. Se puede comenzar por diseñar un vehículo cuyo peso sea notablemente menor que el de otro de gasolina o diesel y dotado de las mismas prestaciones. Varias características del motor de metanol permiten ese aligeramiento de peso. Este motor, como el diesel, inyectaría combustible directamente en la cámara de combustión, en vez de hacerlo a través de un carburador o un colector de admisión de aire. El gasóleo quema espontáneamente si se le somete a compresión, por lo que se debe inyectar en la parte superior del recorrido del pistón contra una presión muy alta, cercana a 1400 atmósferas. Este proceso necesita un sistema de inyección pesado y costoso.

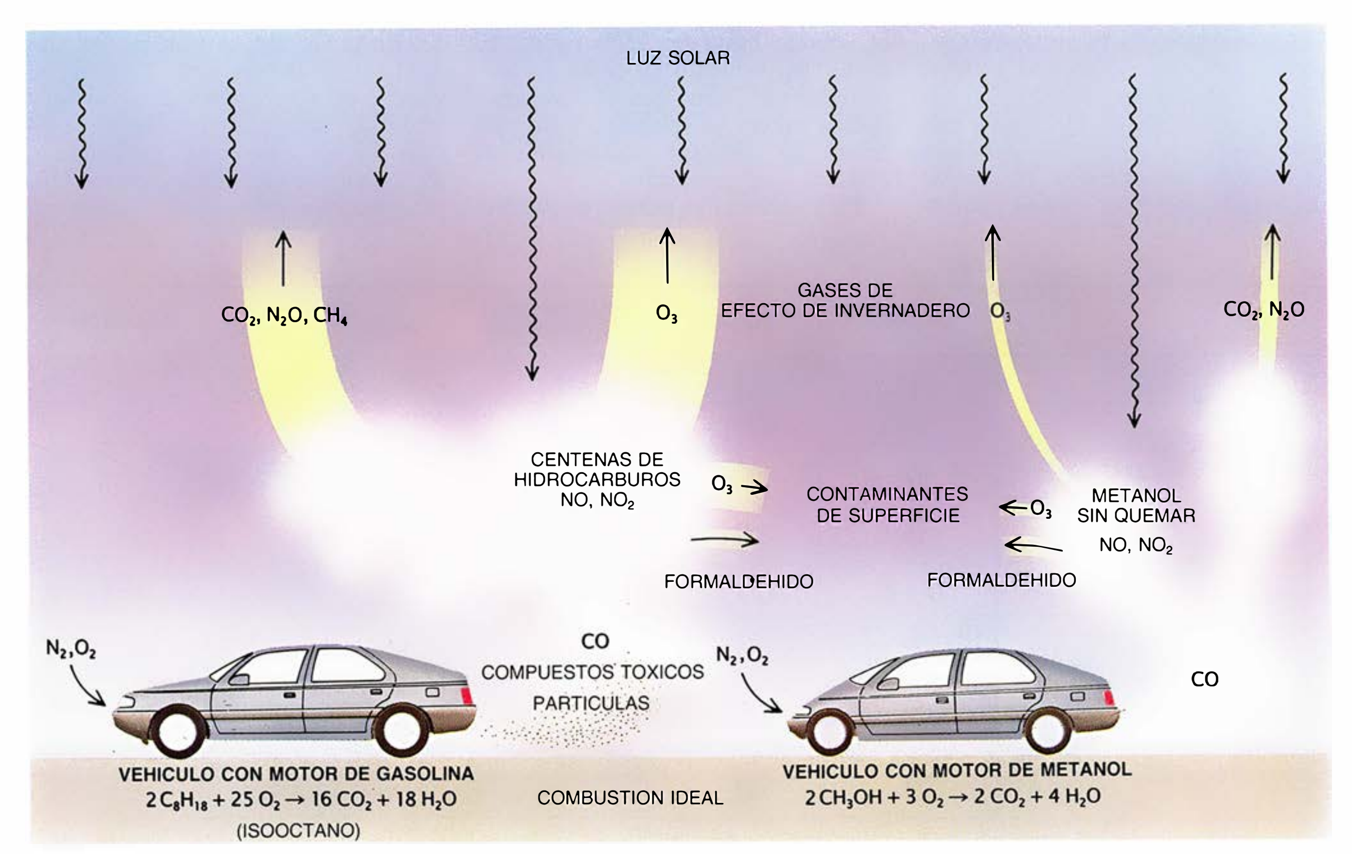
El metanol posee, por contra, un octanaje muy alto, lo que significa que es más difícil la combustión por compresión y se puede inyectar a baja presión en la fase inicial del recorrido de compresión. Por eso el motor de metanol puede pasar con un sistema de inyección más sencillo y barato. Además, se puede sincronizar la inyección para conseguir una combustión más eficiente según las diferentes

condiciones de trabajo del motor. Una inyección tardía crearía una carga estratificada (una mezcla rica y de fácil ignición en una zona de la cámara y otra más limpia y pobre en el resto) para el funcionamiento en régimen de baja potencia. En el caso opuesto, con una inyección precoz daría tiempo a que se mezclasen completamente el combustible y el aire hasta alcanzar una combustión homogénea, que es el proceso más rentable para el funcionamiento en un régimen de alta potencia. Apuntemos por contraste que las propiedades del gasóleo hacen imposible la combustión homogénea. Además, debido a los enlaces carbono-carbono en las moléculas de combustibles fósiles, la potencia de un motor diesel (o de un motor ideal de gasolina con inyección directa) está fuertemente restringida por la necesidad de mantener la emisión de humo dentro de unos límites aceptables.

Gracias a la inyección directa de metanol, que introduce el combustible en las bujías, el motor arranca en seguida, incluso en climas muy fríos, auténtico problema de los motores de metanol donde se introducía el combustible a través de un colector de admisión de aire. Como antes dijimos, el alto octanaje del metanol significa que no arde espontáneamente, ni siquiera bajo una compresión muy alta. Por tanto, el motor se puede turboalimentar o sobrealimentar fuertemente: el aire de admisión se puede comprimir incluso antes de que comience el recorrido de compresión, sin que se produzca la ignición del metanol. Ello reduce el trabajo que debe realizar el motor para introducir aire en el cilindro, a la vez que se aumenta el aire disponible para la combustión. En efecto, el metanol suministra una potencia y un rendimiento tan excelentes, que constituye el único combustible utilizado en la competición de las 500 millas de Indianápolis.

Otra propiedad importante del metanol: reduce la pérdida de calor durante la combustión. Por tres razones principales. Primera, el metanol necesita para evaporarse una cantidad de calor diez veces mayor que una cantidad equivalente de gasolina; en consecuencia, la temperatura máxima del gas de combustión —causa de las pérdidas de calor— es menor. Segunda, como el metanol no tiene enlaces carbono-carbono no produce hollín. Debido a que las partículas de carbón son muy eficientes radiando calor, su ausencia rebaja notablemente la pérdida de calor por radiación. Tercera, el metanol presenta una relación mayor entre moléculas de gas de combustión y moléculas reactivas que la gasolina o el gasóleo. Esto mejora el rendimiento con que el calor expande el gas y reduce también la temperatura de los gases de combustión, porque hay más moléculas de gas de combustión que se han de calentar con la energía liberada durante la combustión.

La baja pérdida de calor del metanol tiene las ventajas obvias de mejorar el rendimiento y aumentar la energía calorífica retenida en los gases de escape (que se pueden recuperar para trabajo útil mediante un método que expondremos más adelante). Aunque no resulte evidente a primera vista, esta característica puede contribuir a aligerar el peso: si con el metanol se reducen notablemente las pérdidas de calor, podría cambiarse el sistema de refrigeración. En efecto, el radiador y el ventilador se



3. EMISIONES de los futuros vehículos de metanol: podrían contener un 20 por ciento del dióxido de carbono y un 10 por ciento de los diversos hidrocarburos emitidos por los vehículos actuales que queman gasolina. Los vehículos de metanol eliminarían casi por completo las emisiones de partículas en suspensión y compuestos tóxicos. Los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno reaccionan fotoquímicamente dando lugar a ozono sobre la superficie del suelo, que es irritante para las vías respiratorias superiores. El ozono, CO_2 y otros gases contribuyen al efecto de invernadero.

podrían eliminar simultáneamente aplicando un revestimiento térmico —cerámicas, por ejemplo— a las paredes de la cámara de combustión y menguando la diferencia de temperatura entre los gases de combustión y el refrigerante del motor con refrigerantes más calientes (aproximadamente de 150 a 200° C). Varios investigadores han intentado aplicar esta idea a los motores de gasolina y especialmente a los diesel, pero no se ha obtenido ningún resultado práctico por culpa de las altas temperaturas de combustión y la gran pérdida de calor asociada a estos combustibles.

La eliminación del radiador aportaría sustanciales ventajas al vehículo de metanol: pesaría menos y posibilitaría el diseño de modelos que opusieran menos resistencia aerodinámica. (Los vehículos al uso deben mantener un equilibrio de compromiso entre el diseño aerodinámico para alojar el radiador y una gran área superficial para obligar al aire a que atraviese el compartimento del radiador y del motor.) Teniendo en cuenta todos los factores, el peso de este motor, incluidos sus componentes estructurales y su sistema de refrigeración, sería tan sólo la mitad del peso de un motor diesel y dos tercios de otro de gasolina.

Si el motor y el sistema de refrigeración fueran más ligeros, se podrían aligerar otras partes del vehículo propulsado por metanol. Un motor más ligero repercute en el peso del resto del vehículo: así, el chasis, sistema de suspensión, frenos y ruedas pueden ser más ligeros. De hecho, una reducción de un kilogramo en el peso del motor comporta una reducción asociada de 750 gramos en el peso de otros componentes. Un vehículo más liviano necesitaría menos energía para acelerar o para superar la resistencia a la rodadura de los neumáticos y las pérdidas internas por fricción, por lo que la reducción de peso propiciaría un motor más ligero aún.

El vehículo que nosotros prevemos combinaría un motor de metanol ligero y eficiente con una transmisión manual de cinco velocidades o una transmisión automática, continuamente variable. El motor se acoplaría a la transmisión a través de un volante con doble embrague controlado por ordenador. El conductor no notaría nada anormal hasta que accionara la llave de contacto, a excepción del contorno aerodinámico del vehículo. La llave activa un pequeño motor eléctrico que acciona el volante. En cinco segundos, el volante alcanza un régimen de 2500 revoluciones por minuto, momento en que se desactiva el motor eléctrico, dejando que el volante gire libremente. Mientras la llave está en la posición de encendido, el motor eléctrico entra en acción periódicamente para impulsar de nuevo el volante hasta las 2500 r.p.m. El motor del vehículo no entra en funcionamiento hasta que el conductor decida mover el vehículo, y de esta forma no consume combustible ni produce contaminación.

Para arrancar el motor, el conductor presiona el pedal del acelerador, lo cual indica al ordenador que ha de engranar el motor al volante. El motor comienza a funcionar casi de inmediato, ya que la inyección directa del combustible elimina los retrasos habituales del arranque. Si el conductor levanta completamente el pie del acelerador, el ordenador desengrana el volante y el motor se para de nuevo. Para mover el vehículo, el conductor hace funcionar el motor, mueve la palanca de cambio a la posición de conducción o introduce la primera velocidad, y seguidamente pisa el pedal del acelerador. Si se presiona poco a poco, el ordenador libera gradualmente el embrague y el vehículo acelera de forma suave. Si el pedal se presiona rápidamente, el ordenador envía más combustible al motor, el embrague se libera en seguida y el vehículo acelera con rapidez.

El vehículo responde como cualquier coche convencional de transmisión automática, excepción hecha de la sensación de pasar directamente de un motor "apagado" a la aceleración. La versión equipada con una transmisión continuamente variable se comporta en todo como si tuviera una transmisión automática normal, con la salvedad de que el motor funciona siempre del modo más eficiente. En la versión de transmisión manual, el conductor debe accionar el cambio de velocidades, pero no lleva pedal de embrague porque el vehículo tiene embrague automático. Para alcanzar la máxima aceleración, el conductor debe pisar a fondo el

	METANOL	ETANOL	GAS NATURAL COMPRIMIDO	GAS DE PETROLEO LICUADO	ELECTRICIDAD
CANTIDAD/DIVERSIDAD DE MATERIAS PRIMAS	++	–	++	–	++
INFLUENCIA SOBRE EL AMBIENTE	++	++	++	++	++
PRECIO DEL VEHICULO	0	0	–	–	––
UTILIDAD DEL VEHICULO (autonomía, espacio para equipaje)	0	0	––	0	––
PRESTACIONES DEL VEHICULO	0/+	0/+	––	–	––
COSTE ACTUAL DE EXPLOTACION DEL COMBUSTIBLE (poca demanda)	–	––	0	0	0/+
COSTE FUTURO DE EXPLOTACION DEL COMBUSTIBLE (gran demanda)	++	–	+	0	0/+
CONVENIENCIA DE REPOSTAJE (tiempo, complejidad)	0	0	––	––	––

++ MUCHO MEJOR QUE LA GASOLINA
+ ALGO MEJOR QUE LA GASOLINA
0 SIMILAR A LA GASOLINA
– ALGO PEOR QUE LA GASOLINA
–– MUCHO PEOR QUE LA GASOLINA

4. COMPARACION de las características ambientales, económicas y prestaciones de los combustibles alternativos con las de la gasolina obtenida a partir de petróleo crudo. Se supone que los vehículos se diseñarían para obtener el rendimiento y las características óptimas con cada combustible.

acelerador. Con ello entra en funcionamiento un sobrealimentador accionado por correa que generará un sensible aumento de potencia.

Cuando en un momento dado no se necesite potencia del motor —por ejemplo, cuando el conductor observa que se acerca a un semáforo— se libera el acelerador y el ordenador desengrana el motor del volante, dejando aquél de funcionar. Al principio, esto producirá una sensación algo desconcertante, ya que estarán ausentes el sonido del motor en funcionamiento y la impresión del motor frenando: parecerá que el vehículo se ha "calado". Cuando el vehículo decelera hasta una velocidad del volante de 2500 r.p.m., se activa el segundo embrague y el volante gira liberado de la transmisión que decelera. Mientras el vehículo se va parando o se mantiene "a la espera", únicamente queda girando el volante, "almacenando" energía para arrancar el motor cuando el semáforo cambie a verde. Los motores diesel y quizá los de gasolina con inyección directa podrían emplear este sistema de volante, pero los motores y los vehículos pesarían mucho más y, sobre todo, aumentarían algunas de las emisiones, como partículas en suspensión, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos que producen ozono.

En comparación con el vehículo medio actual, las mejoras expuestas podrían reducir la pérdida de energía (y la emisión de gases que provocan el efecto de invernadero) en un coche de metanol de cuatro plazas entre un 60 y un 80 por ciento. Gran parte de las pérdidas restantes provienen del frenado y de la expulsión de gases de escape calientes. Para conseguir un mayor rendimiento adicional y reducir aún más la emisión de dióxido de carbono, se han de encontrar formas de recuperar la energía contenida en estas fuentes. Una manera interesante de recuperar la energía disipada al frenar sería la de instalar un motor de bomba hidráulica de flujo variable. Este sistema engranaría el volante durante el frenado, bombeándose fluido en un depósito que sirve así para frenar el automóvil y transformar la energía cinética del movimiento del automóvil en energía potencial en el depósito. Posteriormente, la energía almacenada se aprovecharía para hacer girar el volante. Si la presión en el depósito alcanzara un nivel suficiente, la energía hidraúlica podría aumentar la potencia de impulsión del motor. (Este sistema podría emplearse también en un automóvil diesel o de gasolina.)

SINTESIS DEL METANOL

El metanol (CH_3OH) se sintetiza por medio de una reacción catalizada de monóxido de carbono con hidrógeno.

$$CO + 2H_2 \xrightarrow{\text{CATALIZADOR}} CH_3OH$$

Es muy probable que el monóxido de carbono necesario se obtenga del gas natural (metano) o carbón como materia prima. El gas natural (CH_4) reacciona con el agua o el oxígeno para formar monóxido de carbono e hidrógeno. También se produce algo de dióxido de carbono en el proceso general que proporciona calor u oxígeno.

$$\text{CALOR}$$
$$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3H_2$$
$$2CH_4 + O_2 \longrightarrow 2CO + 4H_2$$

Para producir metanol a partir del carbón, éste se debe gasificar. El carbono (C) que hay en el carbón reacciona con agua y oxígeno para formar monóxido y dióxido de carbono e hidrógeno. El proceso origina un mayor residuo de dióxido de carbono que el proceso basado en el metano, porque el carbón tiene una mayor relación de carbón a hidrógeno.

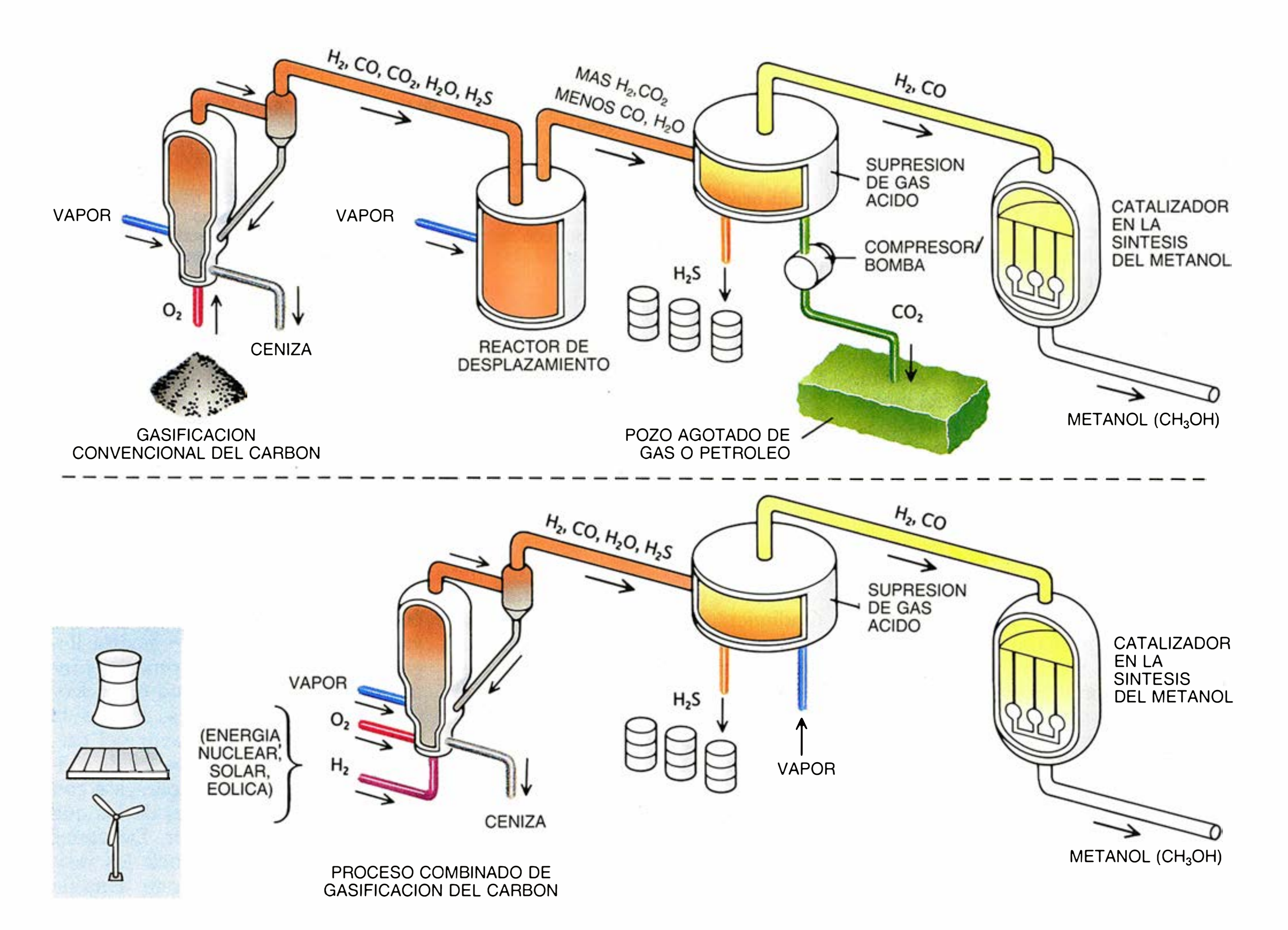
$$2C + H_2O + O_2 \longrightarrow CO + CO_2 + H_2$$
$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$$

Otro ingenio que aumentaría el rendimiento se basa en la excepcional tendencia del metanol a disociarse catalíticamente a una temperatura bastante baja. Al fluir desde el depósito de combustible hacia el motor, el metanol atravesaría un pequeño disociador donde se utilizaría el calor de los gases de escape para descomponer el metanol en monóxido de carbono e hidrógeno, que contienen un 20 por ciento más de energía que aquél. Esta reacción tomaría el calor procedente del escape y lo transformaría en energía química de primera calidad. El combustible enriquecido se enviaría posteriormente a la cámara de combustión.

Al considerar la influencia sobre el ambiente de la adopción del metanol, no olvidaremos su método de fabricación. El gas natural sería una materia prima atractiva: el gas que escapa o se quema en pozos de petróleo lejanos podría convertirse en metanol, cuyo transporte hasta el mercado de consumo resulta menos caro. Este método no sólo acabaría con el desperdicio de energía, sino que también eliminaría una fuente substancial de gases que contribuyen al efecto de invernadero. A corto plazo, el metanol se sintetizaría en los países donde abunda el gas natural, mientras los precios del petróleo permanezcan bajos. Lamentablemente esto significaría que se continuaría dependiendo de energía importada. Una alternativa interesante sería aprovechar la gran cantidad de gas natural producida en la Vertiente Norte de Alaska; de hecho, si la producción de petróleo en esa zona disminuye en la década de los noventa, el oleoducto de Alaska podría transportar metanol.

A largo plazo creemos que el carbón —del que poseen grandes reservas los Estados Unidos— podría llegar a ser una materia prima más interesante. Esta posibilidad ha provocado algunas objeciones porque la síntesis del metanol a partir del carbón produce mayores niveles de dióxido de carbono en comparación con otros combustibles fósiles de los que también se puede extraer. De varias maneras se pueden reducir los residuos de dióxido de carbono. Una de ellas consiste en adoptar procesos con mayor rendimiento en los que una proporción mayor del carbono presente en el carbón se transforme en metanol, en vez de dióxido de carbono. Un segundo método consistiría en recoger el dióxido de carbono emitido por la planta de producción, bien para venderlo o bien para deshacerse del mismo rellenando pozos agotados de petróleo y de gas. Cabría incluso una tercera opción a largo plazo: añadir hidrógeno al proceso; el exceso de dióxido de carbono se podría convertir entonces en más metanol. El hidrógeno se obtendría de la electrólisis del agua utilizando electricidad suministrada por una central eléctrica de combustible no fósil.

Si se exigiera que las fábricas de metanol alimentadas por carbón mantuvieran dentro de un límite las emisiones de dióxido de carbono, y si se crearan vehículos de metanol pensados para alcanzar un elevado rendimiento, es de prever que las emisiones totales de dióxido de carbono descendieran hasta la quinta parte de la cantidad producida actualmente por los vehículos que queman gasolina refinada a partir del petróleo crudo. Si se extrajera metanol de la bio-



5. SE PRODUCE DIOXIDO DE CARBONO en la síntesis convencional del metanol a partir del carbón (*parte superior*), cuando éste se gasifica en hidrógeno y monóxido de carbono, y, en una segunda etapa, cuando se añade vapor para aumentar la relación de hidrógeno a monóxido de carbono. El dióxido de carbono sobrante, junto con el sulfuro de hidrógeno producido por el azufre del carbón, debe eliminarse antes de que la mezcla pase sobre catalizadores sensibles para obtener metanol. El dióxido de carbono podría bombearse rellenando un pozo agotado de petróleo o gas. O también el exceso de carbón (que produciría, de suyo, dióxido de carbono) podría convertirse en metanol añadiendo hidrógeno desde una fuente externa, como podría ser la electrólisis del agua en una central eléctrica de combustible no fósil (*abajo*). (Esquemas realizados por George Retseck.)

masa, que absorbe la misma cantidad de dióxido de carbono que emite, éste no llegaría a la atmósfera y las contribuciones al calentamiento global del planeta serían despreciables.

La demanda de metanol combustible abriría un nuevo mercado para el carbón con alto contenido de azufre, que actualmente se quema en las centrales de energía eléctrica, y que contribuye en gran parte a la lluvia ácida. En lugar de despedir a miles de mineros u obligar a la instalación de costosos depuradores en las centrales, las autoridades políticas podrían reducir las emisiones de lluvia ácida destinando el carbón con alto contenido de azufre a la obtención del metanol, mientras que las reservas de carbón con poco azufre podrían alimentar las centrales eléctricas. Este programa no sólo suministraría al país un combustible más limpio para el transporte y reduciría la lluvia ácida, sino que aumentaría también los puestos de trabajo y fomentaría el crecimiento económico, reduciría las importaciones de petróleo y el déficit de la balanza de pagos, amén de reforzar la seguridad nacional.

Para estimar los costes de este cambio, bueno sería prestar atención a lo siguiente. Si el carbón con alto contenido de azufre se convirtiera en metanol, éste podría sustituir con creces al petróleo que Estados Unidos importa del golfo Pérsico. Si los miles de millones de dólares destinados a aumentar la presencia militar de los Estados Unidos en dicha zona se pudieran gastar en plantas industriales para convertir el carbón en metanol, estas fábricas se amortizarían en menos de dos años y facilitarían combustible líquido, limpio y nacional durante décadas.

Hemos resaltado muchos de los beneficios inmediatamente previsibles del empleo del metanol como combustible y hemos delimitado algunas de las áreas que necesitan una mejora técnica en el futuro. No obstante, un cambio de esta magnitud requiere un detenido examen para salir al paso de los nuevos problemas que se planteen. Creemos que se pueden resolver todos los problemas adelantados.

Los críticos arguyen, por ejemplo, que los vehículos de metanol duplicarían las emisiones de formaldehído liberadas por los automóviles de gasolina. (Se supone que el formaldehído procedente de las emisiones de los vehículos es el responsable de alrededor de 75 casos de cáncer al año en los Estados Unidos.) A pesar de todo, no se olvide que sólo una tercera parte del formaldehído relacionado con las emisiones de los vehículos procede directamente del tubo de escape; los dos tercios restantes se deben a la transformación fotoquímica de los hidrocarburos emitidos en

formaldehído. Los vehículos de metanol puro producirán únicamente un diez por ciento de los hidrocarburos que emiten los vehículos de gasolina y que se transforman fotoquímicamente en formaldehído. Así, pues, el nivel de formaldehído ambiental podría disminuir si los vehículos se propulsaran con metanol. En cualquier caso, este efecto se vería empequeñecido por la influencia que tendría el metanol sobre otros contaminantes cancerígenos del aire, entre los que se incluyen partículas de gasóleo, butadieno 1-3, compuestos orgánicos policíclicos y benceno. La EPA atribuye al conjunto de estos compuestos 800 casos de cáncer al año. Estos contaminantes tóxicos quedarían casi totalmente eliminados si el metanol sustituyera a la gasolina y al gasóleo.

Los ingenieros del sector no consideran graves obstáculos otras objeciones contra el uso del metanol: carácter corrosivo y fuertemente tóxico, explosivo en un recipiente cerrado y productor de una llama casi incolora. Para evitar la corrosión se sustituirían algunas partes del sistema de alimentación de combustible por el acero inoxidable o por plásticos baratos como el polietileno. Para evitar la posibilidad de ingestión accidental, se pueden mezclar niveles muy bajos de colorantes y odorantes con el metanol (de suyo incoloro e inodoro). Para prevenir la ignición accidental del vapor de metanol, se colocarían pantallas de protección, o supresores de llamas, en la boca del depósito de combustible. Este último dispositivo prevendría, además, el sifoneado, que es la causa principal de la ingestión accidental de combustible. Digamos de paso que el vapor de metanol al aire libre es mucho menos inflamable que la gasolina, por lo que es más seguro en derramamientos y accidentes de automóvil. En el extraño caso de un incendio en el vehículo sería probable que ardieran también otras sustancias además del metanol produciendo llamas visibles; mas, para aliviar las preocupaciones, se podría añadir alguna sustancia que hiciera visible la llama del metanol.

Existen poderosas razones para comenzar pronto la transición hacia el metanol, toda vez que el programa tardará muchos años en alcanzar la cota de beneficios. Para dar ese paso se necesita del concurso nacional. Toda la infraestructura del transporte está diseñada para soportar los combustibles derivados del petróleo; las actividades de los principales sectores de la economía tendrán que coordinarse para que el proceso triunfe. Aunque el desarrollo de medidas alternativas a estos combustibles puede ser de interés nacional, quizá no lo sea de inmediato para algunos sectores o ciertas compañías que dependen de la infraestructura existente. Las empresas no desean fabricar automóviles para los que todavía no cuentan con una amplia red de distribución de combustible; los propietarios de gasolineras no quieren despachar un combustible que el usuario no demanda todavía. Se les ha de convencer de que el metanol es una opción alternativa viable, y necesitarán incentivos para realizar los cambios necesarios.

Aunque este no es el lugar apropiado para un análisis pormenorizado de asuntos económicos y políticos relacionados con la transición a combustibles alternativos, queremos resaltar dos puntos importantes. Primero, se debería recordar que existe un precedente positivo de la introducción de un nuevo combustible para el transporte en todo el país: el gobierno federal y las industrias petrolíferas y automovilísticas trabajaron conjuntamente en el lanzamiento de la gasolina sin plomo en 1975. Segundo, muchos países europeos gravan impuestos sobre la gasolina a un nivel que, de aplicarse en los Estados Unidos, no sólo animaría al desarrollo de combustibles alternativos sino que también ayudaría a aliviar el presupuesto federal y el déficit comercial. Es hora de que los Estados Unidos comiencen a diseñar un sistema de transporte basado en el metanol para el próximo siglo. Obrando así, el país daría un gran paso hacia delante en la resolución de sus problemas ambientales y se aseguraría su futuro energético, amén de consolidar su liderazgo en la planificación del transporte mundial del mañana.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOVING AMERICA TO METHANOL. Charles L. Gray, Jr., y Jeffrey A. Alson. University of Michigan Press, 1985.

AUTOMOTIVE METHANOL VAPORS AND HUMAN HEALTH. Informe especial del Comité de Investigación del Instituto de la Salud. Health Effects Institute, mayo de 1987.

NEW TRANSPORTATION FUELS. Daniel Sperling. University of California Press, 1988.

QUANTITATIVE ESTIMATE OF THE AIR QUALITY IMPACTS OF METHANOL FUEL USE. Armistead Russell et al. Preparado para la California Air Resources Board y el South Coast Air Quality Management District por la Universidad Carnegie-Mellon, mayo de 1989.

Taller y laboratorio

Los segmentos coloreados de un retículo producen el halo de los tubos de neón

Jearl Walker

"Difusión neónica" es una expresión, un tanto desconcertante si no se está en el secreto, introducida en 1975 por Harrie F. J. M. van Tuijl, de la Universidad de Nimega, para describir cierta ilusión óptica que difumina los colores de manera que guarden cierta semejanza con el halo que envuelve los tubos fluorescentes de neón.

Nuestro sistema visual posee una habilidad extraordinaria para reducir, a una imagen mental reconocible, la intrincada cantidad de información que recogen nuestros ojos. No obstante, bajo ciertas circunstancias, la imagen contiene curiosos errores: las ilusiones ópticas. Gracias a éstas, podemos muchas veces vislumbrar algunos aspectos del funcionamiento del aparato visual humano que, sin ellas, no se manifestarían. Hay ilusiones en las que la incapacidad del aparato visual para reproducir una imagen mental fidedigna de un esquema más bien parco puede resultar harto desconcertante.

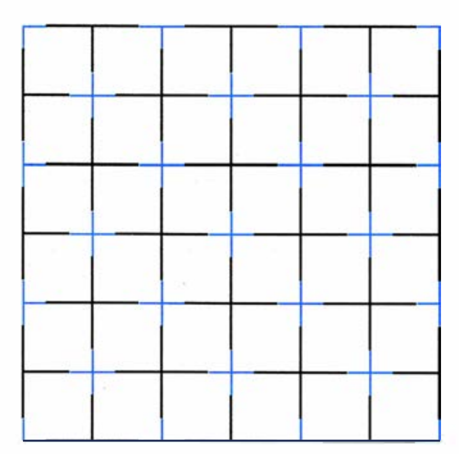
Una de las demostraciones prácticas que hace van Tuijl de la ilusión de la difusión viene perfectamente al caso. La ilustración de la figura 1 es simple, pero podemos percibirla erróneamente, es decir, ser víctimas de una ilusión óptica. Sosténgase la página verticalmente, con las líneas horizontales niveladas, y evítese fijar la vista en lugar concreto alguno de la ilustración. (Pueden facilitarse las cosas si la página se mantiene algo más lejos de la distancia habitual de lectura.) Aparecerán entonces unas manchas brillantes, teñidas de azul, cubriendo las cruces azules, cual si parte de la tinta azul de éstas se hubiera corrido por la superficie de la página. Puede que estas manchas parezcan además enlazadas formando como pasillos inclinados. ¿Por qué aparecen esas manchas?

La ilusión de la difusión neónica está relacionada con la percepción ilusoria llamada de contornos subjetivos, de la que tratamos en esta sección en marzo de 1988. Un ejemplo de contorno subjetivo puede crearlo el lector volviendo a dibujar el retículo de modo que haya espacios en blanco donde ahora hay cruces azules. En esos espacios en blanco percibirá manchas circulares brillantes con bordes definidos. Por supuesto, las manchas brillantes no existen; se dice que son subjetivas. En la ilustración de van Tuijl, el azul de las cruces se difumina y llena los círculos. Las manchas brillantes ilusorias en los espacios vacíos y los coloridos neónicos que rodean las cruces coloreadas pueden tener un origen similar, puesto que aparecen en el mismo tipo de dibujo.

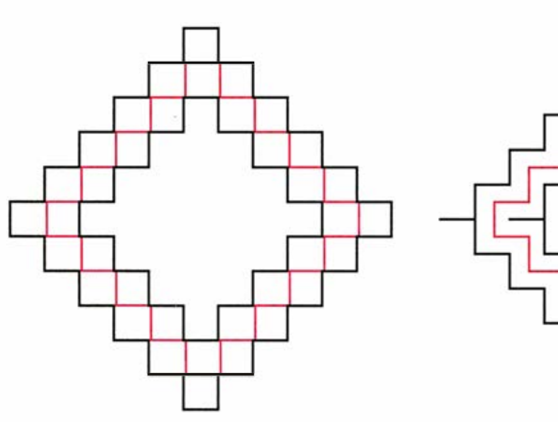
Los dos dibujos que se reproducen en la figura 2 se deben también a van Tuijl y tienen por objeto poner de manifiesto que la difusión neónica no se presenta forzosamente en los motivos reticulares. En la ilustración izquierda, el rojo parece esparcirse dentro del marco del dibujo, pero en la derecha el rojo queda confinado en sus líneas. Las interconexiones, presentes en la izquierda pero no en la derecha, deben tener cierta importancia.

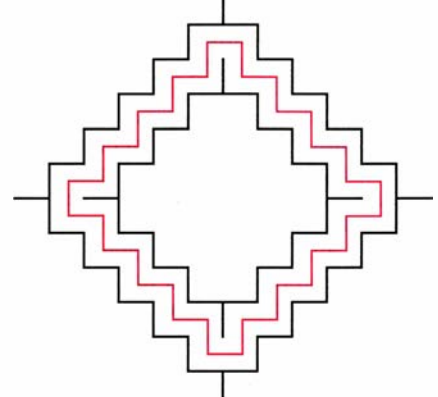
En 1979, van Tuijl y su colega Charles M. M. de Weert examinaron más retículos, entre los que se contaban algunos de líneas brillantes sobre fondo oscuro. De su trabajo surgieron tres reglas. Para que aparezca la difusión neónica, tanto el retículo básico como las cruces interpuestas deben ser o más claros o más oscuros que el fondo. Si ambos son más oscuros que el fondo, tal como en la figura 1, las cruces deberán ser menos oscuras que el retículo (azules en vez de negras, en este caso). Si ambos son claros sobre fondo oscuro, el retículo deberá ser más claro que las cruces. En uno y otro caso, por tanto, las cruces deben tener una luminosidad intermedia entre la del retículo y la del fondo.

Aunque estas reglas permitan predecir si un determinado motivo reticular exhibirá difusión neónica, nada revelan acerca del origen de la ilusión. Esta, según van Tuijl y de Weert, proviene de la manera en que el sistema visual interpreta lo que capta: por lo visto encuentra más sencillo percibir unas tenues manchas coloreadas y unas cruces apagadas y os-



1. Retículo de van Tuijl.





2. El retículo de la izquierda crea la ilusión, pero no el de la derecha.

curas que no la figura auténtica. Este argumento lo volvieron a exponer en otro trabajo, también de 1979, van Tuijl y E. L. J. Leeuwenberg, colega asimismo suyo.

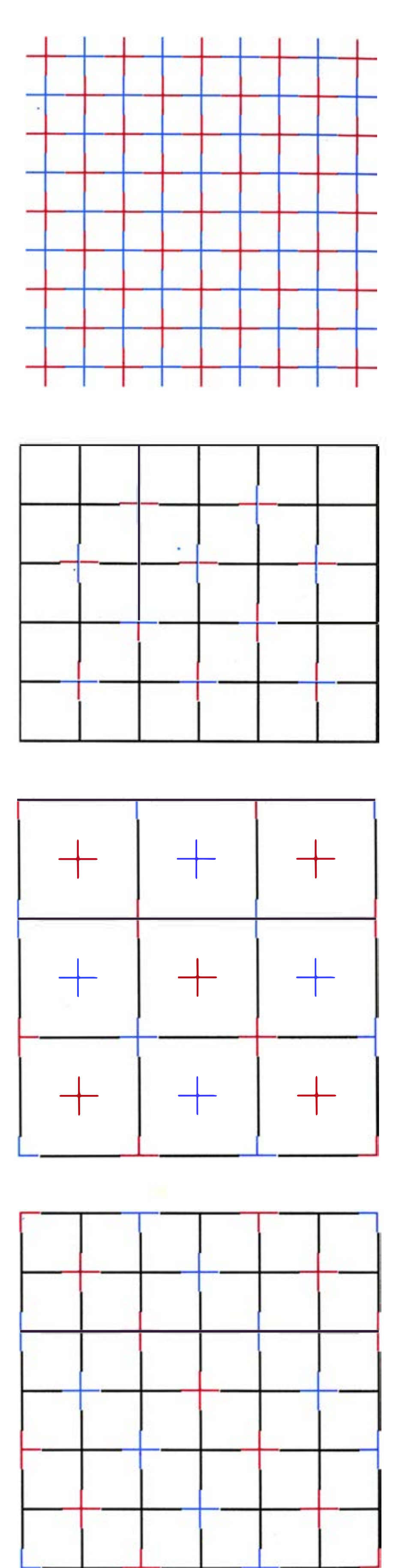
Puede que aquí precisemos aclarar el concepto de eficiencia. Como ejemplo, volvamos a la figura 1. Al contemplarla, una información relativa a las líneas negras y cruces coloreadas es enviada a lo largo del trayecto que va desde los ojos a la corteza visual. En algún punto de ese recorrido, el sistema trata de atribuir un significado a lo que está captando. Compara, pues, las luminosidades relativas del fondo, el retículo y las cruces, y examina asimismo la escena en su conjunto, especialmente los elementos repetitivos. El sistema puede tratar de ligar la escena con otras que ya haya visto en el pasado. Puede también recapacitar si hay partes que pudieran estar ocultas por objetos más cercanos al observador. Tras ponderar estos y otros aspectos, realiza unas interpretaciones y hace llegar una imagen definitiva al nivel consciente.

Cuando miramos la primera de las ilustraciones de van Tuijl, nuestro sistema visual posiblemente decida que la interpretación más verosímil sea que se trata realmente de un retículo completo de líneas negras, con partes del mismo disimuladas u ocultas por proyecciones de manchas circulares de color azul. En los lugares del retículo donde parecen incidir esas proyecciones, el halo azul mitiga el contraste entre las cruces coloreadas y la zona blanca circundante tiñendo el blanco.

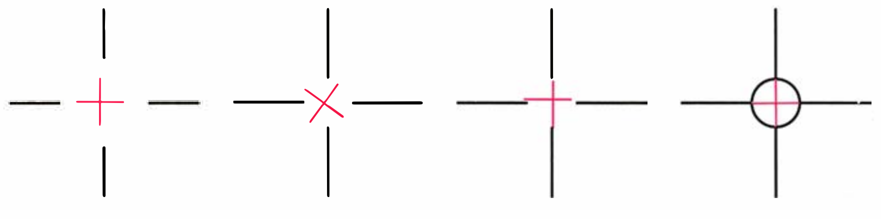
¿Por qué llega el aparato visual a una interpretación como ésa? Acaso porque pretenda completar los trozos de las líneas que se extienden unas hacia otras al modo en que lo hacen las líneas negras desde cada lado de una cruz coloreada. De esta manera, la escena quedaría relacionada con otros retículos o estructuras reticulares vistos anteriormente con cierta frecuencia (una verja, por ejemplo). Es normal que un objeto más próximo al observador que una estructura reticular aparezca más claro que el retículo; el hecho de que las cruces brillen más que las líneas negras corrobora la impresión de que se hallan delante del retículo y obstaculizan la visión. Sin embargo, no es habitual encontrarse con una cruz colocada con tal perfección que oculte precisamente porciones definidas del retículo y, por ello, el sistema visual evoca la presencia de una mancha, la cual constituye un obstáculo más aceptable. Si las cruces son más oscuras que el retículo, la interpretación fracasa por completo porque las cruces ya no parecen estar delante del retículo; el intento de completar mentalmente el retículo no tiene éxito y no hay necesidad de recurrir a manchas que ocultan la figura ni se da la difusión neónica.

Personalmente esa explicación me parece incompleta. No creo que un retículo simple me lo pueda imaginar con mayor facilidad que uno con cambios de color, que de hecho es más interesante. Me preocupa también el hecho de que, tras darme cuenta de que la ilusión es un error, no pueda desembarazarme de ella. Incluso cuando examino la ilusión durante un rato, concentrándome en el error, sigo percibiendo la difusión del color. Si mi sistema visual se esfuerza por mejorar su eficacia, y además compara la visión actual con la información adquirida anteriormente, sin duda debería al menos reducir, si no eliminar, el error introducido por la difusión neónica, tras una experiencia suficiente y una reflexión consciente. En vez de esto, ¿podría ser que, en cierta etapa del sistema visual, algún proceso físico introduzca un error tal que, en el instante en que llegue al nivel consciente, se halle tan enraizado que ni la experiencia visual ni la fuerza de voluntad puedan expulsarlo? Si es así, ¿dónde tiene lugar exactamente el proceso generador del error?

En 1981 hubo una abundante cosecha de pistas, cuando Christoph Redies y Lothar Spillmann, ambos por entonces en la Universidad de Friburgo (Alemania occidental), informaron de sus estudios acerca de las variantes de los motivos reticulares capaces de producir difusión neónica [*véase la figura 3*]. En la ilustración superior de la figura 3 hay cruces rojas que sustituyen algunas cruces del retículo, reemplazando otras cruces azules el resto. Las cruces rojas están afectadas de difusión neónica roja, las cruces azules están afectadas de difusión neónica azul y las manchas coloreadas quedan conectadas por pasillos oblicuos rojos o azules. Para apreciar óptimamente la ilusión, debe volver a colocarse la página de modo que las líneas horizontales del retículo queden niveladas y ajustar la distancia de la página a nuestros ojos. Si luego giramos la página alrededor de nuestra visual, la ilusión se debilita conforme el giro se acerca a los 45 grados y reaparece a medida que las líneas del retículo que antes estaban verticales se van poniendo horizontales.



3. Variantes de los retículos ilusorios.



4. *Variantes sobre un elemento de retículo.*



5. *Variantes sobre líneas y cruces.*

Alejémonos del retículo hasta que las cruces azules se oscurezcan lo suficiente para fusionarse con las líneas negras que conectan. Aunque ya no podremos distinguir el color de las cruces, éstas seguirán induciendo la visión de algo que percibiremos como manchas azules. Si las cruces fueran amarillas en vez de azules, al alejarnos se irían diluyendo en el fondo hasta desaparecer, pero todavía seguiríamos reconociendo manchas amarillas. Uno y otro experimento ponen de manifiesto que, aunque el color de las cruces no sobreviva en el nivel consciente, aún puede continuar desencadenando la difusión neónica.

Cuando las cruces rojas o azules están separadas de las líneas del retículo, tal como en la segunda ilustración de la figura 3, no son capaces de producir difusión neónica para ningún ángulo de orientación; así, pues, la yuxtaposición de las líneas negras del retículo con las cruces debe ser crucial para la ilusión. Adviértase asimismo que una cruz separada está más nítidamente definida y contrasta mejor con el fondo que otra intercalada en el retículo: como en los ejemplos anteriores, la difusión neónica hace que las cruces parezcan apagadas y borrosas.

En la figura 3 vemos dos variantes más. En la tercera ilustración cada cruz está formada por una línea roja y otra azul. Desde ambas líneas se corren los colores, pero no tanto como en los ejemplos anteriores. En la ilustración inferior se han suprimido las líneas negras, por lo que el retículo consta sólo de cruces rojas y azules. No obstante, la difusión neónica es fuerte y produce pasillos oblicuos coloreados. Este resultado nos revela otra regla acerca de la luminosidad. En este último caso, el "retículo" puede considerarse formado por las cruces rojas o azules, pero en ambos casos las cruces del otro color pueden tomarse como "las cruces". Es evidente que la difusión puede aparecer cuando ambos elementos tienen una luminosidad aproximadamente igual, pero son más oscuros que el fondo.

Redies y Spillmann estudiaron el modo en que la intensidad de la difusión depende del tamaño angular de las cruces de color intercaladas en una red negra. Cuando el dibujo se halla exactamente en la visual (se llama entonces visión foveana), para que aparezca la difusión neónica, el ángulo que ocupa una cruz en el campo visual del observador ha de estar comprendido entre cuatro y 35 minutos de arco. En el límite inferior de este margen, la difusión es máxima y llena todo un círculo. En el límite superior, es más débil y adopta la forma de un diamante. Cuando el ángulo es aún mayor, la difusión del color se reduce y afecta únicamente a la zona contigua a las barras de la cruz, efecto éste denominado "flanqueo neónico". Cuando el dibujo se halla desviado algunos grados de la visual exacta (visión extrafoveana), los extremos superior e inferior del intervalo angular que limita la difusión neónica toman valores algo más altos. Todo esto indica por qué las ilusiones de estas páginas suelen reforzarse si el lector ajusta su distancia a las ilustraciones: con ello, lo que hace es variar el ángulo que en su campo visual subtiende cada línea o cruz de color, optimizando la ilusión.

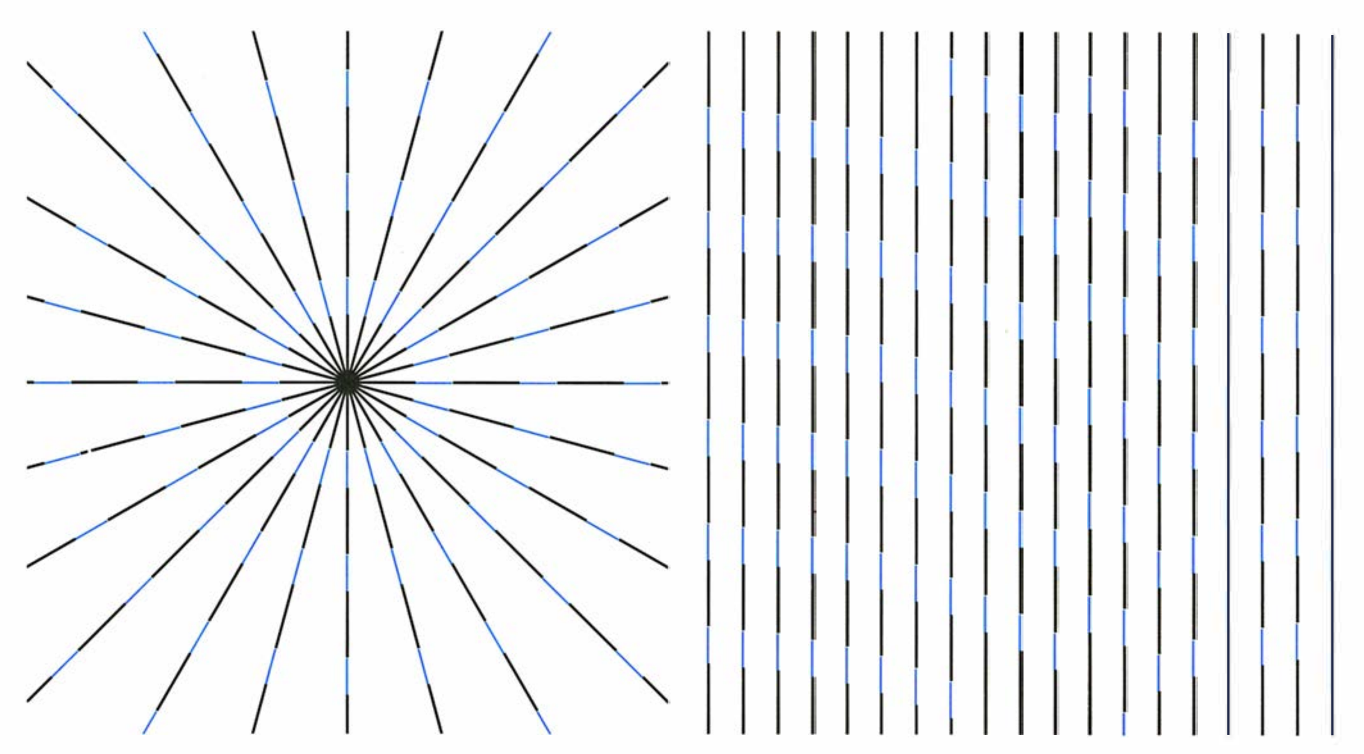
Redies y Spillmann estudiaron también variantes de un elemento simple constituido por una cruz con líneas negras en cada extremo, como se muestra en la figura 4. Cuando la cruz está desconectada de las líneas negras por una separación o una desalineación debida a un desplazamiento o rotación, la difusión neónica desaparece. También desaparece si la cruz se encierra en una circunferencia. Si las líneas negras son cortas, la ilusión es fuerte; incluso es posible que siga dándose, si bien débilmente, aunque en los extremos de la cruz haya simplemente puntos.

Las ilustraciones más intrigantes de Redies y Spillmann son aquellas en que se reduce la ilusión a lo más esencial: líneas y nada más [*véase la figura 5*]. Si se contempla una línea roja aislada, el color no se corre; pero si está empalmada a dos líneas negras formando una recta única, a lo largo de la línea roja se da flanqueo neónico. Este corrimiento del color desaparece si se suprime la línea negra de cualquiera de los extremos.

Ante los resultados de estos y otros experimentos, Redies y Spillmann se atrevieron a conjeturar que la difusión neónica es consecuencia de la actividad de células visuales responsables de la detección de la presencia y orientación de las líneas y que son sensibles a las longitudes comprendidas en los intervalos angulares antes citados. Parece evidente que la difusión neónica sólo tiene lugar si el segmento rectilíneo se prolonga en línea recta por ambos extremos y las prolongaciones difieren del segmento en luminosidad o color. Si las prolongaciones están desalineadas, la promediación y la difusión desaparecen; si hay una sola prolongación, también desaparecen. Cuando en un retículo negro se sustituye un cruce de líneas por una cruz de color, hay difusión en ambas líneas de la cruz, pero esta di-



6. *Respuestas de una célula de extremos bloqueados.*



7. Dibujos que dan difusión y flanqueo neónicos.

fusión es más fuerte que la suma de los flanqueos neónicos a lo largo de esas líneas. Esto sugiere que acaso interactúen las células visuales que detectan cada brazo de la cruz.

En 1984, Redies, Spillmann y su colega Kristian Kunz prosiguieron los estudios acerca del flanqueo neónico. En la figura 7 se presentan dos de sus ilustraciones. En la de la izquierda se observará que, junto al centro de la estrella, las líneas azules están lo bastante próximas para que el color se corra entre ellas, formando un anillo azul; aún más hacia fuera, esas líneas azules dan sólo flanqueo neónico. Puede verse también difusión neónica en la ilustración derecha siempre que los segmentos azules estén alineados o bien desplazados uno respecto a otro de una manera ordenada. Allá donde las posiciones de los segmentos estén al azar, sólo se ven flancos neónicos.

Basándose en indicios recogidos en otros estudios de óptica fisiológica, Redies, Spillmann y Kunz propusieron que las células de "extremo bloqueado" de la corteza visual pudieran ser responsables del corrimiento de una línea de color cuando aparecen difusión o flanqueo neónicos, y las mismas pueden figurar en toda la ilusión. La mayoría de las células de la corteza visual tienen la misión de detectar las líneas; a las células de extremo bloqueado les corresponde en particular detectar las líneas cortas. El campo visual de una célula de extremo bloqueado tiene una región central con zonas inhibidoras en cada extremo [*véase la figura 6*]. Si ambas zonas extremas están activadas, las mismas inhiben la actividad de la región central. Tal organización hace que esas células sean sensibles a las líneas cortas y las convierte en candidatos muy prometedores para explicar la difusión neónica.

Cuando una línea excita una célula, se dice que la primera se ha "proyectado" en la segunda. (Desde luego, la única imagen óptica de verdad se encuentra en la retina; al cerebro llegan sólo señales eléctricas. Pero el concepto de proyección simplifica la descripción del funcionamiento de una célula.) Supongamos que hay una línea roja corta sobre un fondo blanco situada exactamente en nuestra visual y que su proyección es una de las células de extremo bloqueado que controlan la visión foveana. Si la proyección está sesgada respecto al eje mayor de la célula, ésta hace caso omiso de ella; pero si la proyección está alineada con ese eje, la célula envía una señal hacia el interior del sistema visual. Cuando la proyección ocupa únicamente la región central de la célula, esa señal es máxima, transmitiendo la información de que hay una línea oscura sobre un fondo más claro. Lo que así percibimos es una línea roja corta que contrasta perfectamente con el fondo.

Supongamos ahora que la línea roja tenga prolongaciones negras en cada extremo y que esas prolongaciones pasen por las zonas extremas de la célula. Esas zonas inhiben la descarga provocada por la activación de la región central, así que la señal emitida es inferior a la máxima, lo cual indica que la línea no es tan oscura como cuando estaba ella sola. Lo que entonces percibimos es una línea roja que contrasta menos con el fondo, o sea, difuminada, como cuando en las ilustraciones aparecen difusión o flanqueo neónicos.

Una célula de extremos bloqueados puede que rebaje la claridad de una línea; pero, ¿es capaz también de correr el color perpendicularmente a la línea? Esto aún no lo sabe nadie. Ahora bien, hace pocos meses Redies se preguntaba si esas células no interactuarían con otras células contiguas para correr el color de las líneas sobre el fondo inmediato. Se comprobaría determinando qué ángulo máximo puede ocupar una línea para que su proyección no rebase la zona central de una célula de extremos bloqueados. ¿Coincide ese ángulo con el límite superior de unos 35 minutos registrado por Redies y Spillmann para la difusión neónica en la visión foveana?

Quedan además otras cuestiones. Cuando un retículo negro con cruces de color se inclina, ¿por qué se debilita la difusión neónica? ¿Revela

esto que las células de extremos bloqueados reaccionan ante las líneas verticales y horizontales? ¿Por qué desaparece también la difusión cuando una cruz se rodea con una línea negra? ¿Y a qué células visuales se deben los contornos subjetivos?

En mi opinión, el modelo de la célula de extremos bloqueados explica sin duda las reglas de la luminosidad relativas a la difusión neónica, siempre que admitamos que el grado de difusión sea función de la intensidad de la inhibición debida a las zonas extremas. Por ejemplo, recordemos que, para que aparezca la ilusión sobre un fondo luminoso, las líneas de color no deben ser tan oscuras como las negras. Para comprender la razón, considérese de nuevo una línea roja corta con prolongaciones negras. El hecho de que éstas sean muy oscuras significa que las zonas extremas disminuyen en gran medida la intensidad de la señal que sale de la célula, lo cual podría suponer que la difusión neónica y el amortiguamiento de la línea roja poseen intensidad suficiente para dejarse ver. Pensemos ahora en la manera en que una línea negra, corta y con prolongaciones rojas, afecta a una célula. La parte central, muy oscura, tiende a provocar descargas de la célula muy fuertes, y las prolongaciones, al ser más claras que el centro, producen una inhibición escasa; por ello, la difusión neónica y el amortiguamiento de la línea central es también menor. A pesar del interés que reviste ese razonamiento, los neurofisiólogos no lo han sometido todavía a prueba experimental.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A NEW VISUAL ILLUSION: NEONLIKE COLOR SPREADING AND COMPLEMENTARY COLOR INDUCTION BETWEEN SUBJETIVE CONTOURS. H. F. J. M. van Tuijl en *Acta Psychologica*, vol. 39, págs. 441-445; 1975.

THE NEON COLOR EFFECT IN THE EHRENSTEIN ILLUSION. Christoph Redies y Lothar Spillmann en *Perception*, vol. 10, págs. 667-681; 1981.

COLORED NEON FLANKS AND LINE GAP ENHANCEMENT. C. Redies, L. Spillmann y K. Kunz in *Vision Research*, vol. 24, n.º 10, págs. 1301-1309; 1984.

CORTICAL DYNAMICS OF THREE-DIMENSIONAL FORM, COLOR, AND BRIGHTNESS PERCEPTION: I. MONOCULAR THEORY. Stephen Grossberg en *Perception & Psychophysics*, vol. 41, n.º 2, págs. 87-116; 1987.

DISCONTINUITIES ALONG LINES: PSYCHOPHYSICS AND NEUROPHYSIOLOGY. Christoph Redies en *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 13, n.º 1, págs. 17-22; primavera de 1989.

Juegos de ordenador

Un juego de microgolf da a profesionales y aficionados iguales probabilidades de hacer hoyo a la primera

A. K. Dewdney

"Tuve en una ocasión, es cierto, el privilegio de acertar a la primera... Es decir, después de mi golpe se encontró una bola en el hoyo, y mi bola, en cambio, no aparecía por ningún sitio. Es lo que se conoce por prueba circunstancial, la misma clase de prueba por la que se ahorca a la gente."

—STEPHEN LEACOCK, en *Sigma, El mundo de las matemáticas*, volumen 4

El golfista ordinario, armado de todo un arsenal de palos, se esfuerza denodadamente por llevar una bolita hasta un hoyo distante, escondido entre varias hectáreas de césped y protegido por charcas, árboles y trampas de arena. Los jugadores de minigolf se valen de un solo palo, en una carrera de obstáculos mucho más corta, provista en cambio de baches, túneles, cuchillas giratorias y péndulos en oscilación. Los jugadores de microgolf pueden ahora, sin necesidad de palo alguno, tratar de hacer hoyo al primer golpe en la pantalla de un microordenador. Tampoco aquí faltan los imponderables, sin olvidar ciertas transgresiones de las leyes de la física.

Aunque el microgolfista se halla confinado a una butaca, ello no le impide dar medidos toques de "putt", e incluso disfrutar de una dimensión no disponible en los juegos mayores: la de programar. ¿Cuántos de nosotros podemos, en un solo día, diseñar y construir un campo nuevo y jugar en él? Ni el mismísimo Severiano Ballesteros... a menos que sepa programar. Aunque, a decir verdad, Ballesteros no tendría necesidad de ser programador profesional para preparar un campo de microgolf.

Daré los planos de tres hoyos: uno para principiantes y otros dos para jugadores más avezados. Al final del día, todos quienes se atengan a las reglas habrán construido un campo de microgolf a la par con su talento.

Vemos ilustrado el proyecto, en su forma más sencilla, en la figura 1. En este caso, el programa, que he llamado HOYO EN UNO, presenta un único hoyo en un césped ("green") rectangular. El palo —un "putter", pongamos por caso— se ha convertido en el corto trazo rectilíneo que vemos tras una pelotita, en un extremo del verde. El jugador puede situar su "putter" en la orientación que guste, para apuntar y golpear la bola hacia su objetivo, que es el hoyo situado en el otro lado del césped electrónico.

La sencilla versión del microgolf que hemos llamado HOYO EN UNO se queda en puro acierto o fallo. Si la bola rebasa el hoyo, cruzará el borde del campo como si nada hubiese allí, desaparecerá de la pantalla y, tras rodar por la memoria del ordenador, jamás volverá a aparecer. Incluso esta versión del juego tiene su indudable tensión, muy grata.

Al aficionado le es perfectamente posible preparar HOYO EN UNO a modo de trampolín informático desde el que saltar a versiones más avanzadas. Resulta posible insertar fragmentos del programa HOYO EN UNO en los programas que llamo UNO BAJO PAR y AGUILA, que vemos en las figuras 2 y 3, respectivamente.

UNO BAJO PAR se distingue por una zona de peligro cerca del hoyo, una especie de porción umbrosa circular. Si la bola penetra en esta zona, cambia de velocidad y de dirección de forma totalmente impredictible. Asechanzas más traicioneras aún infectan el verde de AGUILA, pero por el momento me reservaré los horribles detalles.

Más o menos una vez al año, acostumbro ofrecer una descripción más detallada de los programas, en beneficio de aquellos programadores noveles o dubitativos que necesitan un poco más de información para lanzarse. La siguiente descripción de HOYO EN UNO adopta el clásico método de facilitar una descripción clara del cómputo a efectuar, dada por lo general en pasos de algoritmo. Desde allí se pasa lo más velozmente posible a auténticos fragmentos de programa. ¡El lector que ensamble todas las piezas encontrará apenas unos cuantos golpes de tecla del Open *Investigación y Ciencia*!

HOYO EN UNO empieza presentando la copa lista ya para jugar; enseguida le pide al jugador que ajuste el bastón e impulse la bola. HOYO EN UNO procede entones a dibujar y redibujar la bola mientras rueda sobre el césped, quién sabe si hasta el hoyo.

A partir de estas especificaciones, ya es posible esbozar un burdo algoritmo para HOYO EN UNO: hay que dibujar el campo, indicar al usuario que golpee la bola, mover la bola muchas veces (para dar animación a la dirección y velocidad del toque) y decidir, cada vez, si la bola ha caído en la copa. Podemos después refinar el algoritmo, al objeto de crear el programa HOYO EN UNO. Para comenzar, la configuración inicial puede quedar plasmada en unos pocos pasos, a saber, dibujo del césped, la copa, la bola y el palo. La programación de estos pasos es sencilla.

Para que mi ayuda sea verdaderamente explícita, supondré que el lector está escribiendo un programa en lenguaje BASIC de un IBM PC. (No se desanime si no posee este equipo. El programa se adapta sin dificultad a otros sistemas.) Para ser más claro, supondré que todos los lectores tienen una pantalla de al menos 300 píxeles de ancho y 200 píxeles de alto. (Un píxel es un punto de la pantalla gráfica.) Todas las distancias sobre la pantalla habrán de medirse desde el origen, que en el IBM PC se encuentra en el ángulo superior izquierdo.

En una pantalla de 300 por 200, resulta perfectamente razonable trazar un césped rectangular de 240 píxeles de ancho por 160 de alto. Para dejar más o menos centrado el campo en la pantalla, HOYO EN UNO sitúa el verde a 30 píxeles del borde izquierdo de la

pantalla y a 20 píxeles de lo alto. En breve, las coordenadas horizontales del césped van de 30 a 270, y sus coordenadas verticales, de 20 a 180. El verde adquiere forma merced a las siguientes instrucciones:

```
10 CLS
20 LINE (30,20)-(270,20)
30 LINE (30,180)-(270,180)
40 LINE (30,20)-(30,180)
50 LINE (270,20)-(270,180)
```

Fijémonos en que, al numerar las sentencias de BASIC en orden creciente (aunque no necesariamente consecutivo), el programador designa el orden exacto en que el ordenador ha de ejecutar sus mandatos. La primera línea, CLS, limpia la pantalla, borrando cualesquiera imágenes que se hubieran podido trazar previamente en ella. Este mandato se emplea cuando se quiere reanudar la ejecución del programa.

HOYO EN UNO representa el hoyo en forma de circulito dibujado en el lado derecho del rectángulo. El centro del hoyo se encuentra a 240 píxeles del borde izquierdo de la pantalla y a 100 píxeles del superior. La instrucción del BASIC que se encargará de dibujar el hoyo es, por tanto,

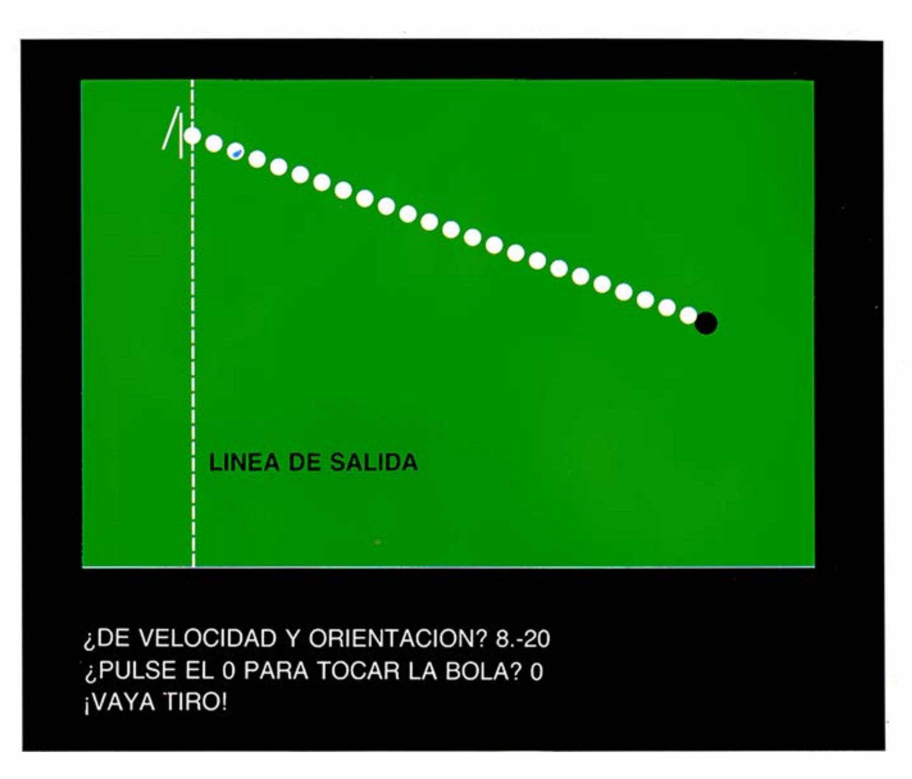
```
60 CIRCLE (240,100),5,1
```

El círculo tiene su centro en el punto de coordenadas (240,100) y un radio de cinco píxeles. El "1" final de la sentencia indica que su color es blanco.

Con el fin de evitar que el tiro sea aburrido, HOYO EN UNO sitúa la bola al azar en un punto de la línea de "tee", que se encuentra a 30 píxeles del borde izquierdo del césped. Dado que la posición de la bola va variando a lo largo del programa, se introducen las variables *XBOLA* e *YBOLA* para llevar control de sus coordenadas,

```
70 XBOLA = 60
80 YBOLA = 160 * RND + 20
90 CIRCLE (XBOLA,YBOLA),4,1
```

La línea 70 restringe la abscisa *x* de la bola, para que coincida con la línea de "tee". La línea 80 selecciona al azar un número comprendido entre 0 y 1, lo multiplica por 160 para ajustar la ordenada de la bola a la escala vertical y suma después 20 al resultado. Ello significa que *YBOLA* se encontrará en algún punto situado sobre la línea de "tee". La línea 90 dibuja la bola con el centro en (*XBOLA*, *YBOLA*). La bola tiene un radio de cuatro, para que encaje en el hoyo, de radio 5.



1. Un tiro afortunado en el verde de HOYO EN UNO.

Un trazo rectilíneo situado justo tras la bola representa el palo, un "putter" o, más exactamente, la cuchilla del "putter". Su posición de reposo está dada como sigue:

```
100 LINE (54,YBOLA + 8) -
    (54,YBOLA - 8)
```

Este trazo vertical es tangente a la bola por la izquierda y tiene 16 píxeles de largo.

Es preciso refinar un poquito más el siguiente paso del algoritmo HOYO EN UNO, que consiste en "pedir al jugador que toque la bola" antes de continuar con la programación. "Pedir" no sólo significa enviar un mensaje que mande al jugador golpear la bola, sino adquirir también la información acerca de la orientación del palo y la velocidad con que se propina el golpe. Dicha expresión significa, asimismo, que HOYO EN UNO ha de redibujar el palo en su nueva posición, para que el jugador pueda juzgar el golpe a ojo.

Se añaden a HOYO EN UNO otras dos líneas de BASIC, destinadas a imprimir un mensaje y a aceptar datos de entrada.

```
110 PRINT "ESCRIBA
    LA VELOCIDAD Y LA
    ORIENTACION"
120 INPUT VELOCIDAD,
    ORIENTACION
```

La variable llamada *VELOCIDAD* almacena la distancia en píxeles que desplaza la bola cada vez que HOYO EN UNO actualiza su posición en el curso de un "putt".

La variable *ORIENTACION* almacena la dirección de movimiento de la bola. Muchos jugadores considerarán que las unidades naturales para dar el ángulo de *ORIENTACION* son los grados. En consecuencia, HOYO EN UNO acepta un ángulo comprendido entre +90 y −90 grados, contados desde una recta horizontal. Los casos extremos representan golpes del jugador que envían la pelota directamente hacia arriba o hacia abajo.

Por desdicha, casi todas las versiones de BASIC manejan las unidades angulares en unidades llamadas radianes, no en grados. Por consiguiente, HOYO EN UNO exige un pequeño cálculo que convierta los grados en radianes.

```
130 ORIENTARAD =
    (ORIENTACION * 3,1416)/180
```

La conversión se basa en que 180 grados equivalen a π radianes.

Los valores de *ORIENTARAD* y de *VELOCIDAD* pueden insertarse en una fórmula que determine la posición y la orientación del palo. HOYO EN UNO necesita la fórmula para dibujar el palo alzado antes de tocar la



2. Una zona crepuscular y una bola-demonio dificultan la vida al golfista de nivel medio.

bola, sea para llevarla hasta la copa, sea para lanzarla de un papirotazo fuera del césped.

La fórmula sitúa el centro del "putter" detrás de la bola a lo largo de la línea de impacto y a una distancia proporcional al valor de *VELOCIDAD*. El "putter" debería tocar la superficie de la bola justamente cuando *VELOCIDAD* es igual a cero; esto es, tendría que estar al menos tres píxeles a la izquierda del centro de la bola. Se descubre entonces que la abscisa *x* del centro del "putter" es el resultado de restar de *XBOLA* el producto de (*VELOCIDAD* + 3) por el coseno del ángulo *ORIENTARAD*. La ordenada *y* se hallará sumando a *YBOLA* el producto de (*VELOCIDAD* + 3) por el seno de *ORIENTARAD*.

Para dar al palo la orientación deseada, HOYO EN UNO se vale de un poco más de trigonometría. Dado que la hoja del "putter" tiene 16 píxeles de largo, sus extremos se encuentran a 8 píxeles del centro. El desplazamiento en la dirección del eje *x* es, entonces, ocho veces el coseno de *ORIENTARAD*, mientras que en la dirección del eje *y* resulta ser ocho por el seno de *ORIENTARAD*.

Estas cantidades, respectivamente denotadas *A*, *B*, *C*, y *D* en el fragmento de programa aquí presentado, se calculan, una por una, en las líneas 140 a 170. Se procede entonces a calcular las verdaderas coordenadas de los extremos "superior" (*XALTA*, *YALTA*) e "inferior" (*XBAJA*, *YBAJA*) del palo. Finalmente, en la línea 220 se dibuja el "putter", que aparece como un trazo que conecta estos dos puntos.

```
140 A = 8 * COS(ORIENTARAD)
150 B = 8 * SIN(ORIENTAD)
160 C = (VELOCIDAD + 3) * COS
      (ORIENTARAD)
170 D = (VELOCIDAD + 3) * SIN
      (ORIENTARAD)
180 XALTA = XBOLA − C + B
190 YALTA = YBOLA + D + A
200 XBAJA = XBOLA − C − B
210 YBAJA = YBOLA + D − A
220 LINE(XALTA,YALTA)−
      (XBAJA, YBAJA)
```

Llegados aquí, podría parecer que el programa está listo ya para pasar a la tercera fase de su funcionamiento, para producir la animación de la bola en su camino hacia el hoyo. ¿Nos hemos olvidado de algo? ¿Qué sucede si el jugador considera que el ángulo de su "putter" es erróneo? El ser humano, falible, merece sin duda una segunda oportunidad. Lo cual se logra bifurcando nuevamente hacia la línea 10 si el jugador opta por ello.

```
230 PRINT "PULSE 0 PARA
    IMPULSAR LA BOLA"
240 INPUT TOQUE
250 IF TOQUE < > 0 THEN
    GOTO 10
```

En este punto, si el jugador pulsa cualquier tecla que no sea la del 0, el programa tomará la bifurcación de regreso a 10, donde borrará la pantalla, volverá a dibujar el césped y solicitará al jugador nuevos valores de *ORIENTACION* y *VELOCIDAD*. Si el jugador pulsa un 0, HOYO EN UNO proseguirá hasta la fase final de su proceso, fase especificada antes por la cláusula "mover la bola muchas veces para dar animación a la dirección y velocidad del toque".

Sin embargo, para mover la bola, HOYO EN UNO ha de incrementar separada e independientemente las coordenadas *x* e *y* de la bola. A tal objeto, la variable *VELOCIDAD* es descompuesta en dos nuevas variables, llamadas *VELOX* y *VELOY*, correspondientes a las direcciones respectivas *x* e *y*.

```
260 VELOX = VELOCIDAD * COS
    (ORIENTARAD)
270 VELOY = VELOCIDAD * SIN
    (ORIENTARAD)
```

La sección final del programa consiste en un bucle, en cuyo seno se efectúan continuamente dos operaciones: movimiento de la bola y verificación de si ha atinado a caer en el hoyo.

```
280 FOR K = 1 TO 300
290 XBOLA = XBOLA + VELOX
300 YBOLA = YBOLA + VELOY
310 CIRCLE(XBOLA, YBOLA),4,1
320 IF ABS(XBOLA − 240) > 4
    THEN GOTO 360
330 IF ABS(YBOLA − 100) > 4
    THEN GOTO 360
340 VELOX = 0
350 VELOY = 0
360 NEXT K
```

La instrucción de la línea 280 define el tipo de bucle más sencillo. Una variable *K* va contando desde 1 hasta 300 para asegurar un número suficiente de ciclos de movimiento y dibujo de la bola que le permitan llegar hasta el hoyo, incluso a una velocidad de 1. En el interior del bucle, se van actualizando las nuevas coordenadas de la bola, y en la línea 310 se procede a dibujarla.

Las líneas 320 y 330 examinan por separado las coordenadas de la bola, con el fin de averiguar si la bola está en el hoyo. Si lo está, las dos componentes de la velocidad se hacen cero, lo que provoca la detención de la bola.

Los profesionales pueden criticar este bucle "for-next" porque el programa continúa funcionando después

incluso de que la bola haya caído en el garlito. HOYO EN UNO continúa revisando las coordenadas de la bola hasta que el contador *K* llega a 300. Para remediar este defecto, el progolfista-mador aficionado podría añadir tres instrucciones más para hacer concluir el programa. Una de ellas verificaría si la velocidad de la bola es nula. Si así resultara ser, una segunda instrucción podría imprimir un mensaje de felicitación, algo así como "¡VAYA GOLPE!". Una instrucción final, requerida en la mayoría de las versiones de BASIC, señala el final del programa con la palabra "END".

Tenemos terminado así HOYO EN UNO. Los lectores que tecleen el programa y lo hagan funcionar podrán comprobar un curioso efecto al tratar de impulsar la bola con diferentes velocidades. La insólita física discreta que parece gobernar el mundo microgolfista de HOYO EN UNO tan sólo producirá un hoyo en un golpe cuando la velocidad de la bola divida exactamente la distancia al hoyo.

Lo que desde un punto de vista podríamos considerar un defecto puede ser un mérito desde otro. Si la física resulta descabellada por accidente, tal vez pueda serlo también a propio intento. UNO BAJO PAR exhibe algunos riesgos jamás vistos en un césped de hierba. A mayores, la bola rebota contra los bordes del campo.

Para describir estas maravillas golfísticas, cambiaré de marcha en mi explicación, dejaré los IBM PC y su BASIC y volveré al lenguaje algorítmico. El campo UNO BAJO PAR, que vemos en la figura 2, tiene forma de L. ¿De qué forma UNO BAJO PAR se asegura de que la bola permanece dentro del contorno mientras rueda? Incluso en el extraño mundo del microgolf, el ángulo de reflexión tiene que ser igual que el ángulo de incidencia. No es condición difícil de establecer para los seis segmentos, a los que podemos llamar *pared1* a *pared6*, sin preocuparnos demasiado de qué pared es cada cual. Cada vez que el bucle principal de presentación calcula una nueva posición de la bola, UNO BAJO PAR verificará si se ha cruzado alguna de las paredes. Por ejemplo, si la bola hubiera cruzado la *pared1*, UNO BAJO PAR tendría que hacer rebotar la bola.

Una vez efectuada tal verificación y su (posible) reflexión consecuente, el programa comprueba si ha sido tocada la *pared2*, después la *pared3*, y así sucesivamente. Aflora, en este punto, un problema interesante. ¿Qué sucede si la bola, al "hacer impacto" contra una pared y sufrir la consiguiente reflexión, se encuentra más allá de otra pared? ¿No cabe la posibilidad de que si la bola está destinada a hacer impacto cerca de un vértice tan sólo rebote en una pared, pero no en la otra? Los lectores que reflexionen adecuadamente sobre esta cuestión hallarán, sin duda, una solución satisfactoria.

Una vez que la pelota ha efectuado todos los rebotes que está destinada a realizar dentro del ciclo en curso, UNO BAJO PAR la muestra y verifica si la bola está en el hoyo, procediendo para ello de igual manera que en HOYO EN UNO. ¿Y qué sucede si el infeliz golfista falla el hoyo? La bola continuará rebotando entre los confines del campo, hasta que acabe cayendo en el hoyo o entre en un ciclo infinito de rebotes. A algunos incompetentes les parecerá una proposición maravillosa; otros rezongarán ante la falta de realismo. El juego ha prescindido de un hecho absolutamente fundamental: ¡la fricción!

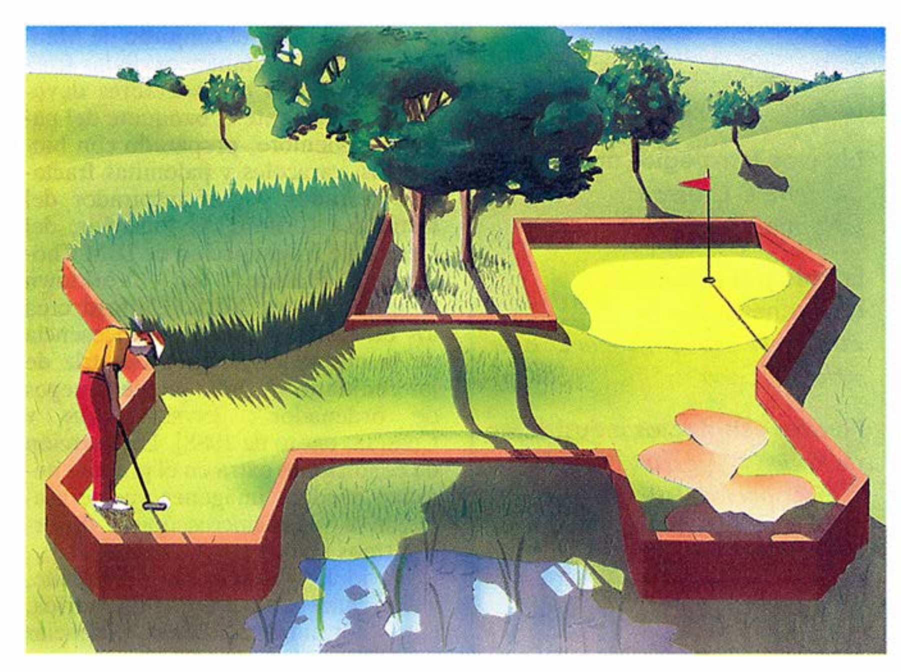
Para hacer que la bola se vaya frenando hasta detenerse, UNO BAJO PAR va multiplicando la *VELOCIDAD* por una constante menor que 1 −0,995 por ejemplo− cada vez que el programa recorre su bucle de movimiento y verificación. Dado que la *VELOCIDAD* se multiplica por 0,995 en cada pasada por el bucle, también *VELOX* y *VELOY* resultarán multiplicadas por esta constante.

Puede suceder, desde luego, que la bola acabe por frenar hasta cero sin haber caído en el hoyo. En tal caso, UNO BAJO PAR ha de poner término al bucle, por lo que el bucle no deberá ser del tipo "for-next", sino del tipo "while..." ("mientras..."). Los bucles de este segundo tipo mantienen el ciclo en funcionamiento en tanto ('while') se cumpla cierta condición. En este caso, la condición es que *VELOCIDAD* sea mayor que algún número pequeño, como 0,05. Llegado este caso, UNO BAJO PAR devuelve al usuario a la porción interactiva de programa, donde se le invita a tocar la pelota.

¿Qué riesgos ha de afrontar el infortunado golfista en el segundo hoyo? Uno de ellos es la llamada zona crepuscular, circular. En cuanto penetra en la zona, la bola experimenta un cambio súbito y aleatorio en su dirección actual. Lo que sucede es que UNO BAJO PAR comprueba si la bola yace en el interior del círculo encantado y, en caso afirmativo, cambia el ángulo *ORIENTARAD* en un valor tomado al azar entre −10 y +10. Planificando cuidadosamente una serie de rebotes contra las paredes, el buen golfista puede esquivar con su bola la zona de penumbra.

El segundo riesgo es más difícil de rehuir. Una bola-diablo da vueltas en torno al hoyo, a distancia fija. La bola-diablo completa una órbita cada diez ciclos del bucle. De darse el caso de que la bola del jugador toque la bola-demonio, la bola del jugador reaparece en la línea de salida. Es casi seguro que a los lectores que han llegado hasta este hoyo se les ocurrirá alguna forma de afrontar este suceso tan temible.

El césped de DOS BAJO PAR es to-



3. Tres peligros del césped para profesionales.

davía más complicado, como podemos ver en la detallada ilustración de la figura 3. Es, en gran parte, una versión corregida y aumentada de UNO BAJO PAR, y se caracteriza por algunos riesgos más avanzados todavía. Por ejemplo, cada vez que la bola atraviesa el cuello que conecta uno y otro extremo del campo, experimenta una fuerza que tiende a arrastrarla hacia el centro de la angostura. Tal fuerza está relacionada con la distancia de la bola a la línea central, como si el paso estuviera airosamente abancado. Existe también una trampa de arena, donde la velocidad no se decrementa según el factor 0,995, sino en el 0,9. Tan sólo el más cuidadoso de los toques nos permitirá salir de la trampa sin enviar la bola a dar trompicones por todo el recinto como un toro escapado del toril. El último riesgo a eludir es un tramo quebrado, donde la pelota se pierde, antes incluso de llegar a pararse. ¿Cómo hallar la bola? Al recolocar el bastón en el lugar correcto, la bola reaparecerá a su lado.

Lo que me inspiró a llevar a los lectores a dar una vuelta por los céspedes del microgolf fue un juego llamado Zany Golf, recientemente lanzado por Electronic Arts, de San Mateo, California. El juego se puede adquirir, qué duda cabe, pero ello supondría echar a perder el grato pasatiempo de construir uno propio. En cualquier caso, los lectores no tienen por qué circunscribirse al golf. Las técnicas descritas se prestan fácilmente a juegos de microchapulines y de billar electrónico.

Los duchos en el conjunto de Mandelbrot, los fanáticos de las fractales y muchos otros lectores devoraron ávidamente el banquete del pasado septiembre, preparado con biomorfos, caracoles y palomitas fractales. Pescador y chef inspirador del festín fue Clifford A. Pickover, del Centro de Investigación de IBM Thomas J. Watson, en Yorktown Heights, Nueva York. Clifford crea los biomorfos valiéndose en esencia de la misma ecuación generatriz de los conjuntos de Julia [véase "Juegos de ordenador"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1988]. La inserción de condiciones extra en el proceso iterativo produce imágenes que se asemejan a vistas microscópicas de organismos vivos.

David J. Hoffman, de Greenville, Texas, hace notar que los biomorfos, cuyas fórmulas contienen potencias de z de más alto grado que los conjuntos de Julia, resultan engendrados más rápidamente. Desde su punto de vista, los biomorfos son conjuntos de Julia a los que se ha añadido "un poquito más". Los píxeles extra no sólo incluyen las espinas y los cilios, sino también el propio cuerpo de la célula: "La porción central del biomorfo es, o bien un conjunto conexo de Julia, o el polvo fractal de un conjunto de Julia que ha hecho explosión."

Algunos lectores tropezaron con dificultades para generar el radiolario de 12 puntas. No obtuvieron la criatura entera, sino, por así decirlo, un primer plano del cuerpo de la célula. La ventana que dimos en el artículo era demasiado pequeña. Se aconseja a los lectores que la amplíen de 3 por 3 a 20 por 20.

¡Qué raro que la bandeja suscitase tanta admiración como los manjares! En concreto, las teselas de Truchet interesaron a casi tantos lectores como los biomorfos propiamente dichos. Son estas teselas simples cuadrados decorados con dos arcos circulares que cortan a dos vértices opuestos. Una ristra de ceros y unos puede ser convertida en un decorado de curvas sinuosas, sin más que reemplazar cada 0 por una tesela de una orientación y cada 1 por una tesela de la orientación contraria. Pickover hace notar que incluso el más leve sesgo en la aleatoriedad de los bits puede originar efectos discernibles, hecho importante para quienes examinan datos en busca de regularidades.

Joseph V. Saverino, de Trexlertown, es ingeniero quimico con querencias estéticas. Variando el diseño de la tesela, Saverino obtiene una gama de resultados que van desde planos de extraño aspecto urbano hasta motivos aleatorios moriscos y bizantinos. Inundando de color algunas de las zonas conexas, Saverino puede extraer casi instantáneamente las porciones conexas de sus configuraciones.

Daniel C. Spencer, de Valencia, California, ha propuesto un programa de dibujos animados: una vez que todos los bits aleatorios se han transformado en teselas, se intercambian, a razón de uno por vez, bits ubicados al azar y se cambia la loseta correspondiente. Según Spencer, tal programa debería hacer que "la pantalla entera... serpease y undulase", ¡en un efecto hipnótico!

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MICROCOMPUTER DISPLAYS, GRAPHICS, AND ANIMATION. Bruce A. Artwick. Prentice Hall, 1984.

Libros

Inmunología, geometría fractal, Charles Babbage y termodinámica

Luis Alonso, Manuel Morán, Philip Morrison y José M.ª Vidal

A HISTORY OF IMMUNOLOGY, por Arthur M. Silverstein. Academic Press, Inc., San Diego, 1988. MILESTONES IN IMMUNOLOGY. A HISTORICAL EXPLORATION, por Debra Jan Bibel. Science Tech Publishers–Springer Verlag; Madison–Berlín, 1988.

"Por esta época (1884-86) Salmon y Smith demostraron que se podía conferir la inmunidad o resistencia inoculando gérmenes muertos; y por los mismos años nuestro Ferrán, verdadero iniciador de las vacunaciones bacterianas en el hombre, había emprendido en gran escala la vacunación anticolérica con gérmenes vivos, y si bien su procedimiento suscitó agrias discusiones y debates, no puede hoy desconocerse la genialidad del sabio español, ni dudarse de la eficacia de su método como por fortuna ha sido reconocido universalmente, inscribiéndose el nombre de Ferrán en lugar señaladísimo de la historia de la humanidad." Esa loa patriótica, objetivamente justa, que se lee a caballo de las páginas 9 y 10 de los *Fundamentos de bacteriología general e inmunología* (Madrid, 1932), no parece haber llegado a oídos de Silverstein ni de Jan Bibel, que no mencionan al médico tarraconense. Los *Fundamentos* constituyen el primer volumen de los "Manuales Ibys", publicados por el Instituto de Biología y Sueroterapia, fundado en 1919; fusionado diez años más tarde con otro instituto de farmacobiología, el THIRF, ese centro agrupó a un número sobresaliente de inmunólogos y biólogos nacionales, entre ellos, Gustavo Pittaluga y José Francisco Tello.

Más. Los *Fundamentos* pueden considerarse un buen antecedente de los libros reseñados, con la limitación obvia de tiempo, ya que sólo cubre la primera etapa y parte de la segunda de las tres en que, a grandes rasgos, se divide el desarrollo de la inmunología. Abarca la primera hasta el primer decenio de nuestro siglo (identificación de antígenos), la segunda se extiende hasta los inicios de la década de los cuarenta (desarrollo de la sueroterapia) y en adelante entraríamos ya en la tercera etapa (bioquímica y genética). Si todas las periodizaciones de la historia son arbitrarias, las de las ciencias no escapan a la convención, aunque a veces se puede hablar con mayor o menor propiedad de cambio de paradigma que las justificaría.

A History of Immunology no es una cronología al uso. Se acerca más a una suerte de enciclopedia histórica de los conceptos de la inmunología que al desarrollo gradual de la disciplina. Con muchas salvedades, por ejemplo en los tres primeros capítulos o en páginas enteras de los siguientes. Silverstein parece sentirse incómodo bajo la mirada de la cronología (tiempo) y geografía (espacio) y prefiere moverse con libertad en el dominio de los conceptos: va y viene del ayer al presente para volver hacia atrás a lomos de una idea, procedimiento que, por contra, marea a veces al lector que advierte la violencia del método. Gusta, además, de introducir reflexiones de filosofía y sociología de la ciencia que no siempre alcanzan la hondura de su interpretación del dato inmunológico. Pero eso no empaña su capacidad de síntesis y su poderoso dominio de la cuestión.

Rastrea los prolegómenos de la inmunología en la naturaleza de la enfermedad y dedica un capítulo (el segundo) a los primeros ensayos, puramente empíricos, de las inoculaciones: Lady Mary Wortley Montagu, Hans Sloane o Edward Jenner. (España aportó un experimento heroico al asentamiento de la vacuna antivariólica con la "Real Expedición Marítima de la Vacuna", que transcurrió de 1803 a 1806. Dirigida por Francisco Javier de Balmis, en ella participaron, amén del personal sanitario, veintidós niños procedentes de la casa de expósitos de La Coruña, que habían de conservar el virus vacunal a través de la inoculación semanal de dos de ellos. A propósito de la misma escribirá el propio Jenner: "Hace pocos días recibí de Madrid un documento relativo a la vacunación que me ha impresionado más que cualquier otro sobre el particular. Ha aparecido en el 'Suplemento a la Gazeta de Madrid'... Enviaré a Ud. –Alexander J. A. Marcet– una copia, por eso no le adelanto nada del contenido de información tan singular. ¡Quiera el Cielo infundir al Gabinete Británico el mismo espíritu filantrópico que el del español!")

Silverstein incardina el antecedente inmediato, la búsqueda de una explicación de la inflamación, en la primera controversia en inmunología. La polémica enfrentó a Ilya Metchnikoff y los celularistas frente a Robert Koch y los humoralistas. Los primeros, afirmados en torno a Pasteur, explicaban los procesos inmunitarios apelando a las células fagocíticas y a los sueros; los segundos, de origen predominantemente alemán, atribuían el poder resistente de los organismos a los anticuerpos frente a las exotoxinas. El decurso de la teoría inmunitaria será una prolongación de esas dos líneas complementarias de trabajo, que alguna que otra vez volverán a enfrentarse, verbigracia, con la teoría de la selección clonal de la formación de los anticuerpos, de F. M. Burnet (1959), y el descubrimiento de J. L. Gowans, en 1966, de que los linfocitos mediaban todas las respuestas inmunitarias. El impulso de la corriente humoralista se debió a la incursión de los químicos en la bacteriología e inmunología: Erlich, Artemius, el propio Landsteiner.

El origen académico de los investigadores ha influido no poco en la creación de la teoría inmunitaria, en todos sus capítulos (formación de los anticuerpos, especificidad inmunológica –es decir, por qué se es inmune ante determinados antígenos y no frente a otros–, autoinmunidad, teo-

ría del complemento, alergias, bases genéticas del sistema inmunitario, receptores, inmunoglobulinas, complejo mayor de histocompatibilidad, rechazo de trasplantes y otros). Niels Jerne prefiere hablar, así, de cis-inmunólogos, los biólogos, y trans-inmunólogos, los químicos. Los primeros insistirían en las implicaciones de la interacción entre antígeno y célula, la liberación del anticuerpo, los cambios de éste ante la inmunización repetida y la tolerancia. Los segundos, conocida la molécula de anticuerpo, abordarían sus relaciones cuantitativas, tamaño del repertorio de anticuerpos y esteoquiometría de las sustancias implicadas. El libro de Silverstein deja ver con claridad uno y otro enfoque en la construcción centenaria de la inmunología. Aunque llega sólo hasta 1970, y no recoge por consiguiente recientes avances tan espectaculares como el de S. Tonegawa con su descubrimiento de las familias de genes que codifican receptores de linfocitos *T* y *B*, el libro se ha convertido ya en manual de consulta altamente apreciado. Conjuga el dominio de los temas con la claridad, facilitada ésta con tres apéndices sobre los jalones del progreso inmunológico, los premios Nobel concedidos a este campo y un diccionario biográfico, amén de un glosario donde se definen los términos principales.

Milestones in Immunology pertenece a la clase de libros en que el historiador de la ciencia se siente feliz. Se le cede la palabra al historiado y, más que a él, a su obra. Pero no se deja el texto desnudo, ni es un centón de citas; aunque tampoco llega al comentario de texto. Se trata de seleccionar un artículo o un capítulo que se han convertido en piedras miliarias en la calzada de la ciencia y presentarlos con unas notas que enmarquen el fragmento en el contexto de su tiempo.

El libro se articula, tras una introducción general, en nueve partes, de extensión desigual a tenor de los progresos registrados: inmunoterapia; alergia, hipersensibilidad e inmunopatología; inmunoquímica; células e interacciones; teorías; agentes y adjuntos; inmunogenética; tecnología y sistemas. A cada parte preceden unas breves páginas de justificación de los escritos seleccionados. Introducción general e introducciones particulares que son mérito exclusivo de la autora, así como la ambientación de los fragmentos. Lo es, por supuesto, la agrupación y la elección de los artículos, y ahí es donde deja un portillo abierto a la discrepancia, igual que el epílogo, trenzado de generalidades y lugares comunes sobre la naturaleza del desarrollo científico y la integración de los sistemas naturales, que, en mi opinión, están de más.

Varios autores, aunque no con la misma publicación, repiten en distintas partes. Nada tiene de extraño, pues entonces la ciencia, en casi toda su extensión, eran ellos. Es una pena, sin embargo, que se hayan "podado" los artículos y, por consiguiente, que se rompiera la paginación original. Así, pierden valor para quien quiera trabajar sobre ellos y le sea difícil su acceso directo. Limitación que se agrava con la traducción al inglés de los artículos de Pasteur o de Koch, por ejemplo. Pero eso es pedirle, injustamente, lo que la compiladora no se ha propuesto. El libro parece destinado al especialista en cualquier rama de la inmunología y al lector inquieto, pero no al especialista en historia, quien sin embargo aprovechará el aluvión de datos y el cabal manejo de los mismos que Bibel realiza.

"Sir Almroth Wright y Sir David Semple, recuerda Bibel, desarrollaron una de las vacunas bacterianas más eficaces contra la fiebre tifoidea." Y recoge su trabajo publicado en 1897 en el *British Medical Journal*. Wright es la figura a destacar. Mas, para la historia de la inmunología española, la obra de Semple no es secundaria. En una carta a Ferrán, firmada por un jefe de servicio del Departamento de Sanidad del Gobierno de la India, leemos: "Le mandamos una memoria titulada 'La preparación de una vacuna, segura y eficaz, contra la rabia', escrito por el Dr. David Semple, Director de nuestro Instituto de Kasauli. Antes de proceder a investigaciones sobre este asunto desearíamos saber si se han realizado experimentos similares en su Instituto (de Barcelona) y a qué conclusiones han llegado. Me atrevo, pues, a pedirle que tenga a bien hacérnoslo saber. Apenas me atrevo a solicitar de su bondad se sirva añadir su opinión acerca de la eficacia del método de tratamiento preventivo descrito en dicha memoria..." La cita no esconde otro propósito que poner, una vez más, de manifiesto que, incluso en proyectos tan serios como el de esta compilación, digna de merecer en los anaqueles universitarios, la ausencia de nombres españoles no es sinónimo de erial. (L. A.)

FRACTALS EVERYWHERE, por Michael Barnsley. Academic Press, Inc.; Boston, 1988.

La geometría fractal está mostrando una capacidad poco usual en otras ramas de las matemáticas para pasar de las revistas especializadas a ser objeto del interés de especialistas en otras áreas científicas e incluso a crear cierta expectación en un público más amplio. El libro que nos ocupa marca un jalón en este proceso. Está dirigido a lectores con conocimientos matemáticos equivalentes a un curso de cálculo universitario y es esencialmente autocontenido, desarrollando el programa de un curso del Instituto de Tecnología de Georgia sobre geometría fractal, en el que han participado estudiantes pre y postgraduados de disciplinas que abarcan desde la psicología hasta la biología, ingenierías diversas, informática, geofísica, química, física, matemáticas...

La clave de una audiencia tan variada tal vez sea la visión innovadora del mundo cotidiano que ofrece la geometría fractal, en contraposición con la visión ofrecida por la geometría euclidiana clásica. Para destacar este aspecto el autor advierte en la introducción sobre el peligro que los lectores corren al leer el libro de perder su visión, arraigada desde la infancia, de las nubes, las hojas y torrentes, las montañas, flores y galaxias, los ladrillos y alfombras... Más allá del posible efectismo de esta advertencia, es cierto que la geometría fractal ofrece un modelo geométrico diferente para tan variados objetos y que el punto de vista fractal es verdaderamente innovador y fructífero, por cuanto refleja más fielmente la realidad que el modelo euclídeo.

Michael Barnsley ha desarrollado una activa labor de investigación en el campo de la geometría fractal con numerosas publicaciones en revistas especializadas en el tema. Una de sus aportaciones ha sido el llamado teorema del Collage. Este teorema muestra un proceso teórico para construir un conjunto fractal, codificado por un número pequeño de parámetros, que reproduce con el grado de exactitud deseado la geometría de un objeto dado. En otras palabras, este teorema puede ser para la aplicación práctica de la geometría fractal algo comparable a lo que la mesa de un delineante con su equipo de compases y reglas es para la geometría euclídea. No es extraño que la misma sensibilidad que ha llevado a Michael Barnsley a descubrir un teorema de estas características le haya conducido a escribir un libro importante para cubrir la laguna existente entre investigación de punta y aplicación práctica de la geometría fractal. Todo el libro está recorrido por este espíritu, siendo

una de sus aportaciones más sobresalientes la colección que contiene de programas –escritos para ordenadores compatibles en el lenguaje de programación “BASIC”–, a través de los cuales se puede establecer un contacto experimental e interactivo con los objetos fractales. Una extensa colección de ejercicios intercalados a lo largo del texto invita al lector a un aprendizaje activo. Tanto los ejercicios como el texto se apoyan en un ingente material gráfico generado por ordenador, incluyendo algunas láminas en color que explotan la enorme belleza plástica de ciertos conjuntos fractales. El material gráfico muestra la preocupación del autor por conseguir un libro fácil de leer para el público no especializado en matemáticas al que se dirige. En consonancia con esta preocupación, el estilo utilizado en la redacción del texto es ameno y pedagógico y trata de rehuir las complicaciones formales superfluas que tanto estorban la comprensión de los textos matemáticos.

El punto de vista adoptado por M. Barnsley para la introducción de los fractales es un punto de vista dinámico, basado en ideas expuestas por el matemático australiano J. Hutchinson en su célebre artículo *Fractals and Selfsimilarity* (1981). El propio autor ha escrito varios artículos de investigación que parten de este punto de vista, cuya potencia, flexibilidad y sencillez lo hacen muy adecuado para un texto introductorio. Consiste este método para construir fractales en la obtención de los mismos como atractores de ciertos sistemas dinámicos, definidos mediante “sistemas iterados de funciones” (*Iterated Function Systems and the Global Construction of Fractals*, M. Barnsley y S. Demko, 1985).

La introducción y el desarrollo de las propiedades de los sistemas iterados de funciones (IFS), y de los conjuntos fractales por ellos generados, constituyen el verdadero hilo conductor del libro. Los preliminares matemáticos son expuestos en los capítulos dos y primera mitad del capítulo tres, tras un primer capítulo con carácter de prólogo. De esta parte preliminar, la demostración del teorema de Blaschke sobre la completitud del espacio H(X) con la métrica de Hausdorff es tal vez la más ardua. Aquí, como en otras ocasiones, el autor ha hecho un apreciable esfuerzo para desgranar el razonamiento en pasos fáciles de entender. En todo caso, la comprensión de esta demostración no es necesaria para la lectura del resto. En la segunda parte del capítulo tres

se introducen los IFS y se enuncia y demuestra el teorema del Collage, dándose primeros ejemplos de sus aplicaciones a la modelación de fractales. El capítulo cuarto profundiza en el conocimiento de los IFS mostrando cómo pueden asociarse a ellos sistemas dinámicos que sirven para generar los mismos fractales que los IFS, y que son de hecho los utilizados para la generación de las imágenes fractales mediante ordenador. Los conceptos necesarios sobre sistemas dinámicos son convenientemente introducidos en la primera parte del capítulo. El capítulo quinto es tal vez el que se aproxima más al punto de vista clásico en geometría fractal, desarrollando los dos métodos más aceptados para medir conjuntos fractales: el concepto de dimensión fractal que se hace muy manejable en ciencias experimentales gracias al teorema del recuento por cajas, enunciado y probado en el texto, y la dimensión de Hausdorff-Besicovitch, que es el instrumento básico en teoría geométrica de la medida.

Los cinco primeros capítulos pueden ser considerados de carácter general e introductorio. El resto del libro –los capítulos seis a nueve– son una selección de temas más específicos, si bien clásicos en el área. En el capítulo seis se desarrolla el tema de construcción de funciones de interpolación con gráficas fractales, adecuadas para el estudio de fenómenos no lineales con conducta fuertemente oscilatoria que observan periodicidad respecto a distintas escalas temporales (precios de un producto, niveles de un flujo fluvial). Como aplicación de este algoritmo se exhibe una curiosidad que conmocionó a los matemáticos de principios de siglo: un método para construir curvas que cubren regiones conexas y compactas de $\mathbb{R}^2$ con superficie no nula.

Los capítulos siete y ocho abordan el apasionante tema de la construcción de fractales generados por sistemas dinámicos complejos que dan lugar a objetos tan clásicos en geometría fractal como los conjuntos de Julia o el conjunto de Mandelbrot (explicados recientemente en la sección "Juegos de ordenador"), cuya belleza plástica cosecha tantos admiradores de la geometría fractal.

Finalmente, en el capítulo nueve se desarrolla la construcción de fractales mediante sistemas iterativos aleatorios, para lo cual se introducen previamente las nociones necesarias de teoría de la medida, cerrando el capítulo y el libro la exposición del teorema de Elton, que puede ser aplicado junto con el teorema del Collage para reproducir, mediante conjuntos fractales generados por IFS no solamente la geometría de objetos dados, sino también sus juegos correspondientes de colores. La portada del libro –una lámina en colores que reproduce la cara de una niña india– se ha generado mediante el empleo de ese mismo sistema.

Estamos en suma ante un magnífico libro introductorio a la geometría fractal, que hará también las delicias de los especialistas, tanto por la sencillez con que el punto de vista general del autor permite desarrollar nociones a menudo consideradas espinosas como por el acierto de la selección de temas específicos que incluyen numerosas aportaciones realizadas por el mismo autor, junto con abundante bibliografía de fuentes originales, para que quienes lo deseen puedan continuar profundizando en los temas de su interés. (M. M.)

THE WORKS OF CHARLES BABBAGE, por Martin Campbell-Kelly, en 11 volúmenes. New York University Press, 1989.

Volúmenes de 25 centímetros de grosor, encuadernados con tapas azules, con todos los textos y fórmulas actualizados y sistematizados, con títulos y subtítulos facsímiles y reproducciones de muchas tablas originales y grabados dan vida a esta elegante edición inglesa de las obras de Charles Babbage, quien fue una figura profética y al mismo tiempo "enigmática en la historia de la ciencia y de la tecnología". La mayor parte del material recopilado ya ha sido publicado en anteriores ocasiones; sin embargo, algunos textos, procedentes de manuscritos y cartas, son inéditos. (No existe por el momento una edición completa de su extensa correspondencia.)

El volumen más grueso, el primero, presenta una veintena larga de escritos matemáticos; todos ellos, excepto un artículo de enciclopedia acabado antes de los 30 años, de finales de 1821. Los dos volúmenes siguientes incluyen sus trabajos más originales, sobre las máquinas calculadoras: propuestas, explicaciones, comentarios y dibujos, junto con menciones periódicas de los trabajos de los autores contemporáneos, incluidos sus dos hijos. Encontramos en esta sección el artículo "Esbozo de la máquina analítica" con su programa de ejemplo y la famosa figura: "la máquina analítica teje modelos algebraicos lo mismo que el telar de Jacquard hilvana flores y hojas". Una joven amiga de Babbage, la matemática Augusta Ada, Lady Lovelace, publicó este breve escrito en 1843, previa traducción y ampliación de un artículo de una revista francesa (también incluida en esta obra), firmado por un ingeniero de Turín que conoció a Babbage y con quien compartió idénticos afanes.

Otros dos volúmenes recogen su constante interés en múltiples campos de la ciencia y la técnica: textos cortos acerca del instrumental del torno, los números, la geología o el código de señales de los faros. Los últimos seis volúmenes corresponden a los seis libros de Babbage. El primero es una introducción para el profano sobre los principios y prácticas de los seguros de vida; viene luego una publicación polémica sobre el auténtico declive de la ciencia en Inglaterra en 1830; otro libro sobre la Exposición de 1851, escrito antes de su inauguración y con duras críticas contra su emplazamiento y organización; le sigue un estudio fragmentario de la relación entre la ciencia y la religión. Por último, dos libros importantes, muy leídos y de gran calidad. Uno es un estudio pionero sobre las máquinas y los procesos de fabricación (muy apreciado por Mill y por Marx); el otro es una autobiografía, atractiva, vital e instructiva, publicada en 1864. Charles Babbage murió en 1871 a los 79 años de edad.

Esta publicación puede hacernos pensar que leer las fuentes originales resulta a veces caro; sin embargo, representa un importante trabajo de recopilación, útil incluso para un lector no especializado. Desde el principio, Charles Babbage se mostró particularmente interesado por la representación figurativa de la información. Antes de iniciar sus estudios de cálculo mecánico mostró predilección por los autómatas, los números, los sistemas de señales, las tablas de funciones (y sus errores) y la notación matemática (primero para cálculos elementales y después para el análisis de funciones). También ideó modelos matemáticos aplicables a las cuestiones cotidianas, basados más en la matemática analítica que en la economía matemática, pero influidos por ambas metodologías.

Se reconoce en Babbage el precursor de las computadoras programadas, a pesar de que sus trabajos, prematuros y mal registrados, no tuvieron ninguna influencia directa visible en el desarrollo posterior de las computadoras, ni mucho menos en su tiempo. Sin embargo, su modelo de razonamiento claramente moderno

–una suerte de perfil general de los intereses de los laboratorios informáticos actuales y afines– revela ya una visión proyectada en el futuro. Su elaborada concepción es uno de los raros ejemplos históricos en que nos encontramos con el "desarrollo de una misma idea en dos contextos independientes", como comenta Alan G. Bromley, historiador de la informática. Hacia 1840 Babbage señalaba ya la necesidad de una memoria y una unidad central de tratamiento, de tarjetas con los datos de entrada y con operaciones secuenciales programadas que funcionarían condicionalmente, con su subrutina contenida en clavijas cilíndricas, como en una caja de música. Bromley señala que este programa sólo podía ser modificado por el usuario.

¿Por qué falló este primer modelo teórico? Conocemos varias razones. Fracasó por ser una máquina analítica cara y falta de aplicaciones claras. (Por ironía del destino, los libros impresos de tablas matemáticas, el funcionamiento económico de la máquina prototipo de Babbage, han quedado todos anticuados frente a las veloces calculadoras que les sucedieron.) Esta máquina tan compleja no tuvo éxito porque no podía construirse un artefacto con toneladas de piezas metálicas interconectadas y un aparato de relojería de peltre. Y también, en cierta medida, fracasó debido al carácter tosco y combativo de su enérgico promotor. (Ph. M.)

INTRODUCCIÓN A LA TERMODINÁMICA DE PROCESOS BIOLÓGICOS, por D. Jou y J. E. Llebot. Editorial Labor; Barcelona, 1989.

Es bien conocido el progreso que la introducción de los métodos físicos y químicos está teniendo en el estudio de los fenómenos biológicos. Si en el primer tercio del siglo actual el protagonismo de la ciencia estaba ocupado por la física, la biología ha pasado a situarse en el primer plano de la actualidad sobre todo gracias al creciente empleo de métodos físicos. A ello se debe el auge actual de ramas tales como la biofísica y la bioquímica. Por otra parte, la progresiva especialización de la enseñanza superior hace que se presenten dificultades en la explotación de los recursos que brindan las materias interdisciplinares. De aquí la gran actualidad de obras como la que reseñamos, escrita por dos especialistas de la Universidad Autónoma de Barcelona.

La termodinámica clásica llamó ya la atención de los biólogos, e incluso de los filósofos, con el criterio de evolución establecido por Clausius, a través de la función entropía, que llevaría a lo que se ha llamado muerte térmica del universo. Después de que Clausius y Kelvin, en el siglo pasado, consiguieron resolver los problemas fundamentales que se presentaron en la formulación de la termodinámica, ésta parecía haber quedado establecida como un cuerpo de doctrina terminado. Quedaron sólo cuestiones de pulido que fueron resueltas poco a poco más adelante. Pero, en lo fundamental, la termodinámica seguía estudiando cuantitativamente sólo estados de equilibrio. Como destacan los autores en el prólogo, en los sistemas biológicos el equilibrio supone la muerte, de modo que el estudio de las situaciones faltas de equilibrio reviste la mayor importancia para la biología. Ya dentro del siglo actual la termodinámica ha ido ampliando su campo de acción para abarcar el tratamiento cuantitativo de situaciones de no equilibrio entre las cuales se realizan procesos irreversibles que, a menudo, son los principales. De aquí el gran interés del libro que reseñamos, pues cubre un dominio que se está ampliando continuamente y en el que se aplican los nuevos métodos de la termodinámica a las cuestiones biológicas.

Toda la exposición, que es de gran claridad, tiene el mérito de reducir al mínimo indispensable los recursos matemáticos que necesita el lector para comprender bien el texto. La obra consta de once capítulos, en el primero de los cuales se hace un breve resumen, muy bien logrado, de la termodinámica del equilibrio. En él se exponen los dos principios clásicos, incluyendo un apartado destinado a destacar la trascendencia que en biología tiene el segundo principio. El capítulo siguiente trata de las consecuencias que tiene la aplicación de los principios en el estudio de sistemas abiertos y desarrolla el concepto de potencial químico, que desempeña un papel importante en el estudio de los fenómenos de transporte de materia. El tercer capítulo aborda el tratamiento termodinámico moderno de los procesos irreversibles considerando la producción de entropía, las fuerzas termodinámicas y las relaciones de Onsager que limitan el número de coeficientes que intervienen en las ecuaciones fenomenológicas. Para algunos, la producción de entropía puede servir como medida del envejecimiento biológico.

Siguen cuatro capítulos dedicados a las aplicaciones de la teoría lineal, en los que se incluyen los fenómenos de transporte de materia, uno de los temas cruciales de la biofísica. El primero de ellos se ocupa de la difusión y de la sedimentación, incluido el estudio del movimiento browniano y de la ultracentrifugación. Continúa en el capítulo siguiente el tratamiento del transporte pasivo en membranas, en el que se analiza la producción de entropía y se da una aplicación al tiempo de igualación de concentraciones. Va a continuación el estudio de las reacciones químicas acopladas, que interesa desde el punto de vista del metabolismo. Prosigue con la descripción del transporte activo, que se presenta en casi todos los tipos de membranas celulares. Se ofrecen, en el siguiente, un modelo eléctrico y otro termodinámico. Finaliza la teoría lineal con un capítulo sobre la fosforilación (conversión de ADP en ATP), básica en el almacenamiento de energía metabólica. Se aplica la termodinámica de los procesos irreversibles, lo que proporciona un esquema de trabajo y un marco teórico que orienta las posibles preguntas del experimentador y ayuda a interpretar los resultados.

Concluye la obra con tres capítulos de teoría no lineal. El primero aborda la estabilidad tanto de los estados de equilibrio como de los estados estacionarios fuera del equilibrio. En el segundo de dichos capítulos se estudian las ordenaciones en el tiempo y en el espacio de sistemas alejados del equilibrio, empezando por el problema de Benard relativo a la ordenación de un flujo convectivo. Sigue la ordenación espacial en reacciones químicas y la ordenación en el tiempo, con mención de los relojes biológicos. El capítulo final expone los sistemas todavía más alejados del equilibrio, en los que se complican las estructuras hasta pasar a una situación caótica a escala macroscópica. Se da el concepto de atractor y se introduce la matematización del caos temporal y del caos geométrico. Se habla de la dimensión fractal y se aplica como ilustración a las proteínas.

No dudamos de que la obra será de mucha utilidad tanto a cultivadores de la biología que quieren aprovechar las posibilidades brindadas por el tratamiento físico de los problemas que tienen que abordar, como a los físicos deseosos de conocer las aplicaciones que permite la moderna termodinámica. El libro ofrece una introducción concisa sobre las ideas básicas de la termodinámica del no equilibrio y llega hasta los campos de investigación más influyentes desarrollados recientemente. (J. M. V.)

Apuntes

En el estudio de la recuperación de la cubierta vegetal en las distintas zonas, tras el azote del fuego, le ha llegado el turno a los páramos de Costa Rica. Como tantos otros lugares de América, se hallan sujetos a una persistente agresión humana; quemados por una cerilla o cigarrillo mal apagado, en los páramos retoñan con fuerza el bambú y ciertas ericáceas, pero no *Hypericum irazuense*, un arbusto endémico que se reproduce por semillas. La colonización de hierbas y arbustos avanza lentamente y quedan calvas sin cubierta vegetal que tardan más de diez años en verdear, intervalo mínimo necesario para que se asienten los *Hyperica*.

Cinco son los principales efectos negativos que la acción del hombre ejerce sobre los lagos alpinos, cuyos ecosistemas están atravesando momentos de especial acoso: destrucción de sus ambientes costeros como resultado de las obras de infraestructura para la habitación humana; eutrofización de las aguas por culpa de la entrada masiva de nutrientes procedentes de los cursos tributarios; contaminación ribereña por aguas residuales; ruptura del equilibrio hidrológico como consecuencia de un mayor consumo de agua potable extraída, e hipertensión creada por las embarcaciones de motor.

¿De quién será propiedad el mapa del genoma humano? ¿De los estados que sufragan la investigación de tan costosa cartografía? Conceder ese derecho de disfrutar de los resultados a quien puso los medios supone dejar que la industria farmacéutica de esas naciones goce del privilegio exclusivo de conocer los genes implicados en determinadas patologías y pueda preparar las drogas oportunas. Parece más sensato admitir que los asuntos relacionados con la vida sean patrimonio común, lo que exige, en contrapartida, la aportación universal de los recursos necesarios.

Newton resiste. Esa es la conclusión a que se ha llegado tras el análisis de las señales que se han esgrimido recientemente en prueba de la existencia de una quinta fuerza no newtoniana. Para someter a prueba la ley de la gravedad, deducida por Newton en 1663 para explicar el movimiento casi circular de la Luna mediante una fuerza dirigida hacia el centro de la Tierra y las órbitas de los planetas mediante fuerzas dirigidas hacia el Sol, se han establecido tres experimentos que midieran la intensidad de la misma en tres puntos: en un pozo de una mina australiana a 1000 metros de profundidad, en la cabeza de un poste de televisión de 600 metros de altura y en un testigo de hielo de 2000 metros de profundidad. Las mediciones realizadas difieren de las predichas por la ley del inverso del cuadrado. Pero, se ha visto ahora, es una discrepancia más aparente que real.

Poco a poco se va conociendo mejor la historia del Mediterráneo. Sabíamos, tras los estudios de K. J. Hsü, de su desecación en las postrimerías del Mioceno, período en que experimentó un cambio rapidísimo de sus condiciones de mar profundo y abierto a otras con deposición de evaporitas. Hoy empieza a emerger un modelo explicativo acorde con el cual las cuencas baleáricas y levantinas formarían, luego, grandes sistemas lacustres. Entre las pruebas, se aduce la concentración de estroncio en las valvas de los ostrácodos.

Para comprender procesos macromoleculares complejos, piénsese en la transcripción o en el transporte de proteínas en las células eucariotas, se comienza a ensayar métodos que conjuguen sistemas de células libres de mamífero con análisis bioquímicos y genéticos de levaduras. Se acaba de realizar lo propio para investigar cómo se desarrolla la replicación de los cromosomas en eucariotas. En este último caso se trata del factor A de replicación de la levadura, que es funcional y estructuralmente afín a la proteína humana precisa para el inicio y elongación de la replicación del ADN del virus de los simios (SV40). Ambos —el factor A y la proteína humana— muestran parecido comportamiento cromosómico, y aquél puede sustituir a ésta, en el sistema de replicación, aunque imperfectamente todavía.

Los campos magnéticos podrían desempeñar una función principal en la formación de galaxias e incluso de supercúmulos y vacíos inmensos. Estos dos últimos, los supercúmulos y los supervacíos, constituyen las mayores estructuras del universo conocido. Se acaba de detectar una débil radioemisión de 326 megahertz en el cúmulo de Coma —adscrito al supercúmulo del mismo nombre y en la linde de un vacío inmenso— cuyo origen implica la existencia de un campo magnético de escala intercumular, que sería un resto fósil de un campo originario pregaláctico, amplificado en el curso de la formación de vacíos intergalácticos y supercúmulos.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



MICROAGREGADOS, por Michael A. Duncan y Dennis H. Rouvray
Pequeños conjuntos de átomos constituyen una forma diferente de materia. Su química, a la vez altamente reactiva y selectiva, tiene posibles aplicaciones en catálisis, óptica y electrónica.

LAS AVES DEL PARAISO, por Bruce M. Beehler
Charles Darwin y Alfred Wallace quedaron fascinados por ellas; los biólogos evolutivos y los estudiosos del comportamiento animal todavía vagan por las pluviselvas de Nueva Guinea para observarlas. Se ha demostrado que, en los Paradiseidos, la ecología de la búsqueda de alimento compone complejas interrelaciones entre plumaje, comportamiento reproductor y organización social.

TELEOPERADORES, por William R. Uttal
A falta de robots completamente autónomos, las máquinas operadas a distancia por el hombre pueden realizar trabajos en ambientes hostiles o remotos.

LOS MISTERIOS MITRAICOS, por David Ulansey
Las imágenes de este antiguo culto mediterráneo sólo se pueden interpretar en términos de una concepción del mundo que situaba en los astros los poderes que rigen el destino de los hombres.

FISICA DEL BOTAFUMEIRO, por Juan R. Sanmartín Losada
Hace siete siglos se desarrolló e instaló un mecanismo destinado al culto en la catedral de Santiago de Compostela. Todavía en funcionamiento, introduce efectos dinámicos refinados. Pudo haber originado las primeras experiencias sobre caos determinista.

EVOLUCION DEL CAMPO MAGNETICO DE LA TIERRA, por Jeremy Bloxham y David Gubbins
El hierro fundido fluye a través del núcleo exterior y crea las condiciones adecuadas que generan el campo magnético terrestre. Los mapas de la actividad magnética ligan dicho fluido a la evolución del campo.

FORMACION DE LA SINAPSIS EN EL DESARROLLO DEL CEREBRO, por Ronald E. Kalil
A medida que el cerebro va desarrollándose, se refinan los procesos sinápticos entre las neuronas y se establecen nuevas conexiones. Esos cambios no son automáticos, sino que descansan en las propias neuronas jóvenes.

LAS PRIMERAS FOTOGRAFIAS EN COLOR, por Grant B. Romer y Jeannette Delamoir
Los esfuerzos por obtener fotografías en color son tan antiguos como la fotografía misma. Ingeniosos sistemas ideados durante el siglo pasado sentaron las bases de la mayoría de los procesos modernos y nos han dejado como herencia recuerdos enternecedores de tiempos y lugares.

